

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Pedro Valle Salles

**AVALIAÇÃO MECÂNICA E DE DURABILIDADE DE CONCRETOS
FABRICADOS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

BELO HORIZONTE
2018

Pedro Valle Salles

**AVALIAÇÃO MECÂNICA E DE DURABILIDADE DE
CONCRETOS FABRICADOS COM RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues
Coorientadora: Profa. Dra. Flávia Spitale Jacques Poggiali

Belo Horizonte, janeiro de 2018

S168a Salles, Pedro Valle
Avaliação mecânica e de durabilidade de concretos fabricados com resíduos de construção e demolição. / Pedro Valle Salles. -- Belo Horizonte, 2018.
xiii, 82 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2018.

Orientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues.

Coorientadora: Profa. Dra. Flávia Spitale Jacques Poggiali

Bibliografia

1. Resíduos Como Materiais de Construção. 2. Resistência dos Materiais - Concreto. 3. Materiais de Construção – Vida Útil – Concreto. I. Rodrigues, Conrado de Souza. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 691.3

**AVALIAÇÃO MECÂNICA E DE DURABILIDADE DE
CONCRETOS FABRICADOS COM RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em
Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil



Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues
Orientador

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



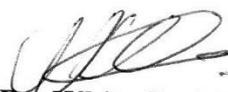
Profa. Dra. Flávia Spitale Jacques Poggiali
Coorientadora

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dr. Peter Ludwig
Examinador

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dr. White José dos Santos
Examinador Externo

Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil, UFMG

Belo Horizonte, janeiro de 2018

Agradecimentos

Aos meus orientadores Conrado de Souza Rodrigues e Flávia Spitale Jacques Poggiali pela orientação, paciência, parceria e confiança.

Aos demais membros da banca, professores White e Peter, pela boa vontade e disponibilidade.

Aos meus pais, Renato e Iara, pelo constante amor, apoio, incentivo e dedicação ao longo dessa jornada.

À Flávia, companheira de todas as horas, pela ajuda, pelo amor e, principalmente, pela paciência.

Aos meus avós pela paciência e apoio incondicional.

À minha irmã, que mesmo distante, se faz presente e a minha amiga, de longa data, Bárbara.

Aos amigos da História, importantes na minha história, em especial, Alexandre, Athená, Aléssio, Bernardo, e Marina.

Aos amigos do CEFET-MG por toda ajuda e camaradagem, principalmente aos companheiros de laboratório: Betina, Raquel, Ricardo, Vitor, Mariana, Thiago, Camila e Marcela.

Ao curso de Mestrado em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais pela sabedoria e pelas oportunidades que me foram oferecidas e aos professores pelo convívio e conhecimentos compartilhados.

Aos todos funcionários do CEFET-MG, em especial, Ivan, Ana Paula e Nathalia e aos estagiários do laboratório Rodrigo e Johnny.

Às empresas ERCA e HOLCIM pela doação de material de pesquisa.

À CAPES pelo financiamento da pesquisa por meio da bolsa de estudos.

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades e por minha vida, família e amigos.

E a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

*Se as coisas são inatingíveis... ora!
Não é motivo para não querê-las...
Que tristes os caminhos se não fora
A presença distante das estrelas!*

Mário Quintana

“Das utopias”

Resumo

O uso de agregados reciclados no Brasil é limitado, sendo restrito a funções não estruturais. A grande heterogeneidade dos resíduos de construção e demolição (RCD) dificulta o uso sistemático desses resíduos em concretos estruturais, apesar disso, está aplicação já ocorre em diversos países, tendo respaldo de normas técnicas. Sendo assim, a presente dissertação propõe-se a analisar os efeitos de substituições (25, 50 e 100%) dos agregados naturais (AN) graúdos por agregados reciclados de construção e demolição (três diferentes tipos) em concretos estruturais. São aferidas características mecânicas e de durabilidade desses novos concretos. Tendo em vista a heterogeneidade da composição do RCD, é exposta metodologia de separação e limpeza dos agregados reciclados. Caracterizou-se os agregados naturais e os três tipos de resíduos e confirmou-se a menor qualidade – para fabricação de concretos estruturais – do RCD em relação ao AN, sendo o agregado reciclado de maior qualidade o ARC seguido pelos ARM e ARV. Os RCD apresentam menores massas, maiores absorções de água, maiores volumes de vazios e menores resistências à abrasão, em relação aos agregados naturais. Com os corpos-de-prova de concreto reciclado prontos, realizaram-se os seguintes ensaios: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone; Ensaio de resistência à compressão; Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão; Ensaio de resistência à tração por compressão diametral; Ensaio de determinação da absorção de água por imersão; Ensaio de resistividade elétrica do concreto; Ensaio de carbonatação acelerada. De maneira geral o uso de RCD afeta, as características do concreto. Trabalhabilidade, resistência à compressão, índice de vazios, absorção de água e módulo de elasticidade são parâmetros afetados negativamente pela adição de RCD. Já a resistência ao avanço da frente de carbonatação é uma característica melhorada com o uso de agregados reciclados. Com relação a existência à tração por compressão diametral, o uso de RCD não afetou esse parâmetro.

Palavras Chave

Agregados Reciclados de Construção e Demolição; Concreto Reciclado; Caracterização Mecânica e de Durabilidade.

Abstract

The use of recycled aggregates in Brazil is limited, being restricted to non-structural functions. The large heterogeneity of the construction and demolition waste (CDW) makes it difficult to systematically use these residues in structural concrete, despite the fact that this application already occurs in several countries, supported by technical standards. Thus, the present dissertation proposes to analyze the effects of replacements (25, 50 and 100%) of natural aggregates (NA) with recycled aggregates of construction and demolition (three different types) in structural concrete. The mechanical characteristics and durability of these new concretes are measured. In view of the heterogeneity of the CDW composition, a methodology for separation and cleaning of the recycled aggregates is presented. The natural aggregates and the three types of residues were characterized and the lower quality - for the production of structural concretes - of the CDW in relation to the NA was confirmed, being the recycled aggregate of higher quality the CRA followed by the MRA and RRA. The CDW present smaller masses, higher water absorption, higher void volumes and lower abrasion resistance, in relation to natural aggregates. With the recycled concrete specimens ready, the following tests were carried out: Slump; Compressive strength; Static modulus of elasticity; Tensile strength by diametrical compression; Water absorption by immersion; Electrical resistivity test of concrete; Accelerated carbonation test. In general, the use of CDW affects the characteristics of the concrete. Workability, compressive strength, void index, water absorption and modulus of elasticity are parameters negatively affected by the addition of CDW. The resistance to the advance of the carbonation front is an improved feature with the use of recycled aggregates. Regarding the existence of diametrical compression traction, the use of RCD did not affect this parameter.

Index Term

Recycled Aggregates of Construction and Demolition; Concrete Recycling; Mechanical and Durability Characterization.

Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico.....	18
Figura 2: Processo de corrosão da armadura do concreto.....	19
Figura 3: Organograma da pesquisa experimental	27
Figura 4: Agregado reciclado pronto para segregação.....	30
Figura 5: Secagem dos agregados reciclados.	31
Figura 6: Agregado reciclado lavado, segregado, seco e peneirado, RCD vermelho (a) e RCD cinza (b).....	31
Figura 7: Material retido na peneira 1,7 mm.....	34
Figura 8: Método de Mistura Dupla.....	38
Figura 9: Aparato para medição de resistividade elétrica do concreto.	39
Figura 10: Câmara de carbonatação acelerada.	40
Figura 11: Coloração da superfície do concreto, após aspersão de fenolftaleína, de acordo seu o pH.	41
Figura 12: Exemplo ilustrativo das localidades preferencias para medição da profundidade da carbonatação (traços pretos).....	42
Figura 13: Separação do RCD em frações.	43
Figura 14: RCD após segregação.....	44
Figura 15: Porcentagens médias acumuladas de agregados retidos nas peneiras da série padrão.....	45
Figura 16: Curva de saturação em 30 minutos.	48
Figura 17: Curva de saturação em 24 horas.	48
Figura 18: Porcentagens médias acumuladas de agregados finos retidos nas peneiras da série padrão.	49
Figura 19: Abatimento médio do tronco de cone.....	51
Figura 20: CP 100%ARV	52
Figura 21: Resistência média à compressão aos 7 dias.	53
Figura 22: Resistência média à compressão aos 28 dias.	54
Figura 23: Ganho de resistência à compressão dos 7 para os 28 dias.	56
Figura 24: Resistência média à tração aos 28 dias.....	57
Figura 25: Módulo estático de elasticidade médio aos 28 dias.....	59
Figura 26: Índice de vazios médio do concreto aos 28 dias.	61
Figura 27: Absorção de água média aos 28 dias.	62
Figura 28: Resistividade elétrica média aos 120 dias.	63
Figura 29: Profundidade média da frente de carbonatação aos 45 dias de exposição.	64

Figura 30: Profundidade média da frente de carbonatação aos 90 dias de exposição.	65
Figura 31: Carbonatação total dos CP da formulação 100% ARV aos 45 (a) e 90 dias (b).	66

Lista de Tabelas

Tabela 1: Principais variáveis adotadas nos estudos abordados.	12
Tabela 2: Comparação entre os estudos de carbonatação apresentados.....	20
Tabela 3: Variáveis de Resposta.	28
Tabela 4: Constituição das classes de RCD.	32
Tabela 5: Descrição do superplastificante utilizado.....	35
Tabela 6: Dosagem do concreto.	36
Tabela 7: Consumo de materiais.	36
Tabela 8: Siglas adotadas para os traços fabricados.....	37
Tabela 9: Porcentagens médias acumuladas de agregados retidos nas peneiras da série padrão.....	44
Tabela 10: Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado na condição saturado superfície seca, massa específica aparente e absorção dos agregados graúdos, valores médios.	46
Tabela 11: Massa unitária do agregado e índice de volume de vazios dos agregados graúdos, valores médios.	47
Tabela 12: Perda por abrasão dos agregados reciclados e naturais, valores médios.....	47
Tabela 13: Porcentagens médias acumuladas de agregado fino retido nas peneiras da série padrão.	49
Tabela 14: Resistividade elétrica do concreto X Probabilidade de corrosão da armadura	64
Tabela 15: Abatimento do tronco de cone.....	78
Tabela 16: Resistência à compressão aos 7 dias.	78
Tabela 17: Resistência à compressão aos 28 dias.	78
Tabela 18: Resistência à tração aos 28 dias.....	79
Tabela 19: Módulo estático de elasticidade aos 28 dias.	79
Tabela 20: Absorção de água.....	79
Tabela 21: Índice de vazios.	80
Tabela 22: Resistividade elétrica aos 120 dias.	80
Tabela 23: Profundidade de carbonatação aos 45 dias.	81
Tabela 24: Profundidade de carbonatação aos 90 dias.	81
Tabela 25: Características físicas e químicas do cimento.....	82

Lista de Siglas e Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/C	Fator Água/ Cimento
ACI	American Concrete Institute
AN	Agregado Natural
ARC	Agregados de Resíduo de Concreto/ Agregado Reciclado Cinza
ARCD	Agregados de Resíduos de Construção e Demolição
ARM	Agregados de Resíduo de Mistro
ARV	Agregado Reciclado Vermelho
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo(s) de Prova
fck	Resistência Mínima Característica
RCD	Resíduos de Demolição e Construção
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages
SLU	Superintendência de Limpeza Urbana
SP	Superplastificante
SP-II R	Superplastificante tipo II retardador de pega
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
ZTI	Zona(s) de transição interfacial

Sumário

1. Introdução.....	1
1.1. Justificativa.....	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1 Objetivo Geral.....	4
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
2. Revisão Bibliográfica	6
2.1. Resíduos de Construção e Demolição	6
2.1.1. Métodos de Tratamento e Melhoria da Qualidade dos RCD	11
2.2. Concretos com Resíduos de Construção e Demolição.....	12
2.2.1. Características do Concreto Fresco.....	13
2.2.2. Características do Concreto Endurecido.....	15
2.2.3. Efeitos do RCD em Características Relacionadas à Durabilidade dos Concretos Reciclados.....	18
3. Materiais e Métodos.....	27
3.1. Variáveis da Pesquisa.....	27
3.1.1 Variáveis de Resposta.....	27
3.1.2 Variáveis de Controle.....	28
3.2. Metodologia de Caracterização do Cimento	29
3.3. Metodologia de Caracterização dos Agregados Graúdos.....	29
3.3.1. Obtenção, Segregação e Limpeza dos RCD.....	29
3.3.2. Separação das Frações do RCD e Definição de Nomenclatura.....	32
3.3.3. Determinação da Composição e Curva Granulométrica.....	32
3.3.4. Determinação de Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção de Água	33
3.3.5. Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios.....	33
3.3.6. Ensaio de Abrasão “Los Angeles”	33
3.3.7. Curva de Absorção de Água dos Agregados Graúdos.....	34
3.4. Metodologia de Caracterização dos Agregados Miúdos	34

3.5. Descrição Aditivo Superplastificante.....	35
3.6. Metodologia de Preparação dos Corpos-de-prova	36
3.6.1. Dosagem do Concreto	36
3.6.2. Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova	37
3.7. Metodologia de Caracterização do Concreto.....	38
3.7.1. Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone	38
3.7.2. Ensaio de Resistência à Compressão.....	38
3.7.3. Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	38
3.7.4. Determinação do Módulo Estático de Elasticidade à Compressão....	39
3.7.5. Ensaio de Determinação da Absorção de Água por Imersão e Índice de Vazios.....	39
3.7.6. Ensaio de Resistividade Elétrica do Concreto.....	39
3.7.7. Ensaio de Carbonatação Acelerada.....	40
4. Resultados.....	43
4.1. Caracterização do Cimento	43
4.2. Caracterização dos Agregados Graúdos.....	43
4.2.1. Separação das Frações do RCD	43
4.2.2. Determinação da composição e curva granulométrica – NBR NM 248 (2003).....	44
4.2.3. Determinação de Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção de Água – NBR NM 53 (2009)	45
4.2.4. Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios – NBR NM 45 (2006).....	47
4.2.5. Ensaio de Abrasão “Los Angeles” – NBR NM 51 (2001).....	47
4.2.6. Curva de Absorção de Água dos Agregados Graúdos.....	48
4.2. Caracterização dos Agregados Finos.....	49
4.3. Caracterização dos Concretos Fabricados.....	50
4.3.1. Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone.....	50
4.3.2. Resistência à Compressão aos 7 e 28 dias.	52
4.3.3. Resistência à Tração aos 28 dias	57

4.3.4. Módulo Estático de Elasticidade aos 28 dias	58
4.3.5. Absorção e Índice de Vazios do Concreto aos 28 dias	60
4.3.6. Resistividade elétrica do concreto.....	63
4.3.7. Avanço da frente de carbonatação aos 45 e 90 dias.....	64
5. Conclusões.....	68
6. Referências Bibliográficas	70
Apêndice I – Tabelas com os Valores Obtidos em Ensaios	78
Anexo I – Caracterização do Cimento Fornecida pela Empresa Fabricante.....	82

1. Introdução

Com grande emprego na construção civil, o concreto e a argamassa, assim como os resíduos de cerâmica, provenientes principalmente de alvenarias e coberturas, constituem a maior parte do que é chamado de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). As enormes quantidades produzidas desses resíduos tornaram-se um problema com vertentes social e ambiental de difícil solução – principalmente no que tange à disposição final dos mesmos (BHUTTA *et al.*, 2013; EGUCHI *et al.*, 2007; HENDRIKS; NIJKERK; VAN KOPPEN, 2007; MEYER, 2009; POON; CHAN, 2007; RAO; JHA; MISRA, 2007; RYOU; LEE, 2014; SAGOE-CRENTSIL; BROWN; TAYLOR, 2001; SIM; PARK, 2011; ZHANG, J. *et al.*, 2015).

O concreto, formado usualmente por cimento, água e agregados miúdos e graúdos, e sua variante principal, a argamassa, são os materiais de construção civil mais importantes e utilizados no mundo (BOGAS; DE BRITO; FIGUEIREDO, 2015; MEYER, 2009). Esse uso massivo implica em um número cada vez maior de recursos naturais sendo extraídos e utilizados, conseqüentemente têm-se uma escassez crescente dos mesmos (BOGAS; DE BRITO; FIGUEIREDO, 2015; EGUCHI *et al.*, 2007; FERREIRA; BARRA; DE BRITO, 2011; LIMBACHIYA, 2004; MEYER, 2009; PEDRO; DE BRITO; EVANGELISTA, 2014; RAO; JHA; MISRA, 2007; SAGOE-CRENTSIL; BROWN; TAYLOR, 2001; SHI *et al.*, 2015; SIM; PARK, 2011; XUAN; ZHAN; POON, 2016).

A produção de RCD e a escassez de recursos naturais são problemas globais, o que altera-se é a forma como os países exploraram essa situação. Nos Estados Unidos, a maior parte dos resíduos sólidos urbanos são RCD, totalizam-se até 300 milhões de toneladas por ano. Assim como no Brasil, não é permitido disposição de RCD em aterros comuns (MEYER, 2009).

Em 1999, a produção per capita anual de RCD em alguns países da Europa era de: 700 kg na Alemanha, 500 kg no Reino Unido e menos de 200 kg na Suécia, Grécia e Irlanda (LIMBACHIYA, 2004). Já na Holanda a produção anual de RCD gira em torno de 14 milhões de toneladas, sendo o RCD a terceira maior fonte de resíduos do país (HENDRIKS; NIJKERK; VAN KOPPEN, 2007). Dados europeus mais recentes apontam que apenas 15 dos 27 países da União Europeia produzem anualmente cerca de 180 milhões de toneladas de RCD (GOMES; BRITO; BRAVO, 2009).

Em Hong Kong, em 2004, mais de 20 milhões de toneladas de RCD foram geradas (POON; CHAN, 2007). Dados mais recentes apontam uma diminuição na quantidade de resíduos gerados, 12 milhões de toneladas de RCD foram produzidas no ano de 2009, sendo 90% desses resíduos formados por rocha, concreto e solo (ZHU *et al.*, 2013).

No Brasil, em 2014, os municípios coletaram cerca de 45 milhões de toneladas de RCD, número 4,1% maior que em 2013 (ABRELPE, 2015). Angulo *et al.* (2009) apontam que metade de todos resíduos sólidos brasileiros são compostos de RCD. Apenas na cidade de São Paulo, em 2003, cerca de 5 mil toneladas diárias de RCD foram recolhidas de áreas públicas ou encaminhados por transportadoras privadas às estações de transbordo e aterros públicos (SCHNEIDER, 2003).

Diante de tais dados, que evidenciam a dimensão do problema da geração e disposição final dos resíduos de construção e demolição, aponta-se a necessidade de discussão de aspectos ligados à gestão e utilização desse tipo de resíduo.

1.1. Justificativa

Com o intuito de abrandar os problemas de geração e disposição final dos resíduos sólidos, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), no ano de 2002, publicou a Resolução nº 307. Esta estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Entre os estabelecimentos dessa norma está a obrigatoriedade de encaminhamento específico ou reuso/reciclagem dos ditos resíduos Classe A – dentre estes entulhos de demolição e construção. A norma define que tanto os municípios quanto os grandes geradores devem elaborar Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil com o intuito de estabelecer procedimentos e critérios necessários para o manejo e armazenamento desses. Ficou terminantemente proibida a prática da disposição em aterros comuns e nos famigerados “Bota-Fora”, se não utilizados prontamente, os resíduos de Classe A devem ser armazenados em aterro específico onde ocorrerá reservação do material para uso posterior (BRASIL, 2002).

Dentre os benefícios do reuso/reciclagem dos RCD encontram-se: o aumento da vida útil dos aterros; a diminuição da ocorrência de deposições irregulares; a redução no consumo de recursos naturais não-renováveis; e a redução dos impactos da construção civil no meio ambiente (CORINALDESI;

MORICONI, 2009; JOHN, 2000). O uso desses na própria construção civil se torna uma alternativa lógica e de grande potencial, utilizada correntemente em diversos países a alguns anos (ABBAS *et al.*, 2009; BHUTTA *et al.*, 2013; KOU; POON, 2012b; RICHARDSON, A.; COVENTRY; BACON, 2011; ZEGA; DI MAIO, 2011; ZHANG, S.; ZONG, 2013)

Tendo em vista este quadro, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) formulou a NBR 15116 (2004). Esta norma estabelece critérios para o aproveitamento desses resíduos. Apesar disso, a norma não aborda o uso de RCD como agregados em concretos estruturais, esse fato coloca a norma brasileira em posição de atraso quando relacionada à algumas normas internacionais, como a recomendação RILEM TC 121-DRG (1994), por exemplo, que trata do uso de concretos reciclados para fins estruturais (ABNT, 2004; RILEM, 1994). Há, portanto, uma demanda de estudo de concretos com agregados reciclados, com isso é possível aproximar-se de uma situação onde esse uso possa ser regulamentado no país.

O uso de RCD como agregado graúdo em concretos é, de fato, um grande avanço no que diz respeito à sustentabilidade, contudo, é notória a grande variabilidade desses resíduos, principalmente quando não há separação na fonte geradora, como no caso brasileiro, que apresentam distintos materiais, com características composicionais muito diferentes (ANGULO, 2005; ANGULO *et al.*, 2009; ANGULO; MUELLER, 2008; HENDRIKS; NIJKERK; VAN KOPPEN, 2007; NAGATAKI *et al.*, 2004). Os RCD têm suas propriedades profundamente influenciadas pelo sistema de gestão ao qual estão inseridos - geração, estocagem, transporte e processamento são exemplos de fatores que podem influenciar na qualidade dos resíduos (HENDRIKS; NIJKERK; VAN KOPPEN, 2007).

O uso de agregados reciclados afeta diversos parâmetros relevantes no desempenho dos concretos, sendo que os efeitos sobre a resistência mecânica (concreto fresco e endurecido) já são estudados há algum tempo e, portanto são melhor compreendidos (FERREIRA; BARRA; DE BRITO, 2011; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002; KOU; POON, 2012a; POON; CHAN, 2007; XUAN; ZHAN; POON, 2016). De maneira mais incipiente pesquisa-se sobre aspectos de durabilidade nesses concretos com RCD (AMORIM; DE BRITO; EVANGELISTA, 2012; EVANGELISTA; DE BRITO, 2010; GENG; SUN, 2013; KOU; POON, 2012b; LEVY; HELENE, 2004; MATIAS *et al.*, 2014; PEDRO; DE BRITO; EVANGELISTA,

2014; RYOU; LEE, 2014; SIM; PARK, 2011; THOMAS *et al.*, 2012; WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011; ZHU *et al.*, 2013).

No Brasil, estudos com foco na durabilidade de concretos com RCD são menos comuns, pode-se citar Werle, Kazmierczak e Kulakowski (2011) e Levy e Helene (2004), com isso, há uma lacuna a ser preenchida nessa área de conhecimento, onde é necessário se avaliar aspectos de durabilidade em concretos com diferentes tipos de agregados reciclados e com diferentes teores de substituição.

Pode-se definir a durabilidade do concreto como a capacidade do mesmo de preservar sua forma, qualidade e capacidade de uso quando submetido ao ambiente para qual foi projetado, ou seja o conceito está intimamente ligado à vida útil do material (MEHTA; MONTEIRO, 2013). Nas últimas décadas a durabilidade do concreto estrutural está tendo maior atenção por parte da Associação Brasileira de Normas Técnicas, apesar disso o uso de RCD em concretos estruturais ainda não é regulamentado. Aspectos relacionados à durabilidade do concreto armado são abordados, direta ou indiretamente, tanto na NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (ABNT, 2014), quanto na NBR 15575 - Edifícios Habitacionais – Desempenho (ABNT, 2013).

O presente estudo visa trabalhar com duas temáticas muito atuais e relevantes, a durabilidades das estruturas e a reciclagem de resíduos de demolição e construção. Analisa-se assim, os efeitos do uso de RCD, como agregados graúdos, nas características mecânicas e de durabilidade do concreto.

1.2. Objetivos

Essa pesquisa visa enriquecer a discussão sobre o uso de resíduos de construção e de demolição (RCD), como agregados graúdos, na produção de concretos estruturais, tendo em vista o efeito desse uso nas características mecânicas e de durabilidade do concreto.

1.2.1 Objetivo Geral

A presente dissertação propõe-se a analisar os efeitos das substituições dos agregados naturais (AN) graúdos por agregados reciclados de demolição e construção – obtidos em usinas de reciclagem e segregados em três frações – nas propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos estruturais.

1.2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da dissertação de mestrado são:

- Avaliar os efeitos da substituição do agregado graúdo natural por diferentes tipos e teores de agregados graúdos reciclados em propriedades relacionadas à durabilidade (resistividade elétrica, carbonatação, absorção de água e índice de vazios) e às características mecânicas dos concretos fabricados;
- Avaliar a necessidade de segregação dos RCD para uso em concretos estruturais;
- Buscar identificar teores e tipos de RCD que maximizem a qualidade dos concretos estruturais obtidos.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Resíduos de Construção e Demolição

A resolução 307 do CONAMA define em seu texto quatro tipos de resíduos de demolição e construção civil. A Classe A é definida como resíduos que podem ser reutilizados ou reciclados como agregados; a Classe B engloba resíduos que podem ser reciclados para outros fins; a Classe C é formada por rejeitos que ainda não contam com tecnologia para sua reciclagem; finalmente, a Classe D é composta por resíduos perigosos (BRASIL, 2002).

Os RCD Classe A, de grande interesse comercial e ambiental, são utilizados como agregados, majoritariamente, em obras de pavimentação viária ou na fabricação de concretos estruturais ou não estruturais (ABNT, 2004; BRASIL, 2002; RILEM, 1994). A presente dissertação há de tratar de concretos fabricados com uso de RCD como agregados.

Os resíduos denominados Classe A são formados por materiais com origem em construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, estando presente, ainda nessa classe, materiais provenientes de escavação e movimentação de terra. Alguns representantes desses RCD são: cerâmicas, concreto, rocha, madeira, forros, argamassa, telhas, pavimento asfáltico, dentre outros (ABNT, 2004; BRASIL, 2002; RILEM, 1994).

De acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004) os agregados obtidos de resíduos Classe A podem ser classificados como: Agregados de Resíduo de Concreto (ARC), contam com pelo menos 90% de fragmentos de concretos e rochas naturais, e Agregados de Resíduos Mistos (ARM), onde não atende-se o teor estipulado para o tipo anterior e há presença de resíduos de cerâmicas de revestimento e vedação, dentre outros. Já a recomendação RILEM TC 121 DGR (1994) classifica em três tipos os agregados reciclados: Tipo 1, são formados por resíduos cerâmicos, tais como tijolos e telhas; Tipo 2, são formados por resíduos de concreto; o agregado Tipo 3 é apresentado como uma mistura de AN e RCD e tem que contar com no mínimo 80% de agregados naturais e no máximo 10% de resíduos cerâmicos. Sendo assim são diversos os materiais que podem ser usados como agregados reciclados: concretos, argamassas, tijolos, revestimentos e telhas são alguns exemplos. Cada tipo de material apresenta características específicas e tem efeitos diversos no concreto.

No Brasil, o uso de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição (ARCD) em concretos estruturais ainda não tem seu uso regulamentado. Contudo, em diversos países do mundo esse uso já ocorre há alguns anos (ANGULO, 2005; ANGULO *et al.*, 2009; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; HENDRIKS; NIJKERK; VAN KOPPEN, 2007; PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007; POON; CHAN, 2007; RICHARDSON, A. E.; COVENTRY; GRAHAM, 2009; SCHNEIDER, 2003; WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011), muitas vezes dentro do próprio empreendimento gerador do resíduo é possível encontrar soluções de aproveitamento e reciclagem dos mesmos, podendo esse fim ser estrutural ou não (HENDRIKS; NIJKERK; VAN KOPPEN, 2007; SALLES *et al.*, 2016).

Compreendendo a constituição dos RCD fica evidente a grande variabilidade dos resíduos e a necessidade de segregação dos mesmos de forma que as características do concreto final sejam mais previsíveis. De acordo com Hendriks, Nijkerk e van Koppen (2007) o momento e local ideais para segregação dos RCD é na própria fonte de resíduos, no momento da concepção dos mesmos, pois, uma vez misturados, é muito difícil a separação completa dos diversos materiais constituintes.

No caso de não haver separação na fonte geradora, situação predominante no Brasil, algumas técnicas podem ser adotadas com o intuito de ter-se maior controle nas características dos agregados. Angulo (2005) e Angulo e Mueller (2008) e Angulo *et al.* (2009) propõem uma separação por faixas densimétricas. Por meio de líquidos pesados, com diversas densidades – bromofórmio e solução de cloreto de zinco (1,9; 2,2 e 2,5 kg/dm³) – o autor segregou o ARCD e obteve resultados que demonstram que quanto maior a densidade dos resíduos mais próximo são suas características dos agregados naturais (ANGULO *et al.*, 2009). Em outro estudo, do mesmo autor, a segregação por densidade é realizada por politungstato de sódio (ANGULO; MUELLER, 2008). No caso de impossibilidade do uso dessas substâncias químicas na separação dos RCD, a maior parte delas apresenta certo grau de toxicidade e perigo ao meio ambiente, uma opção menos onerosa é a segregação manual. Essa pode ser realizada antes ou depois da britagem do material, sendo a primeira situação mais facilmente exequível.

Os resíduos de demolição e construção, mesmos quando tratados e segregados, possuem características que diferem das propriedades dos agregados naturais. Parte dessas mudanças deve-se à argamassa aderida, tanto nos resíduos de concreto quanto nos cerâmicos. Essa argamassa, inerente ao

RCD, traz com ela uma porosidade maior, uma maior absorção de água e uma menor resistência à abrasão, quando comparada aos AN. Além disso introduz-se na mistura uma maior quantidade de zonas de transição interfacial (ZTI). Como ver-se-á a frente essas características diferenciadas podem influenciar no desempenho do concreto (ABBAS *et al.*, 2009; AMORIM; DE BRITO; EVANGELISTA, 2012; ANGULO *et al.*, 2009; BHUTTA *et al.*, 2013; EGUCHI *et al.*, 2007; GENG; SUN, 2013; KOU; POON, 2012b; LEVY; HELENE, 2004; LIMBACHIYA, 2004; MATIAS *et al.*, 2014; OTSUKI; MIYAZATO; YODSUDJAI, 2003; PEDRO; DE BRITO; EVANGELISTA, 2014; RYOU; LEE, 2014; SIM; PARK, 2011; THOMAS *et al.*, 2012; WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011).

A seguir, apresenta-se, as principais características observadas em RCD utilizados como agregados em comparação a agregados naturais comumente utilizados, bem como alguns métodos de tratamento e melhoria da qualidade dos RCD.

a) Massa específica e massa unitária

Nagataki *et al.* (2004) encontraram resultados onde as massas específicas dos RCD graúdos são menores que dos AN. O agregado natural de arenito apresentou valor de 2,65 g/cm³ enquanto que os resíduos obtidos de concretos fabricados em laboratório apresentaram valores que variam de 2,37 g/cm³ a 2,51 g/cm³.

Ferreira, de Brito e Barra (2011) avaliaram tanto a massa específica quanto a massa unitária e nos dois quesitos o RCD teve menor massa em relação ao agregado graúdo de referência. No quesito massa específica os valores obtidos para o RCD e o AN foram de 2,6 g/cm³ e 2,3 g/cm³ respectivamente. Com relação à massa unitária os resultados foram de 1,33 g/cm³ para o AN e 1,14 g/cm³ para o RCD.

Em estudo realizado por Kou, Poon, e Etxeberria (2011) confirma-se a menor massa específica dos agregados reciclados de concreto com relação aos agregados naturais. Os valores encontrados são de 2,35 g/cm³ e 2,62 g/cm³ respectivamente.

Nessa mesma linha Gómez-Soberón (2002) aponta que os RCD finos têm uma menor massa específica, com relação à referência, 2,35 g/cm³ e 2,60 g/cm³, respectivamente, e que os graúdos seguem a mesma tendência, 2,41 g/cm³ e 2,59 g/cm³, respectivamente.

Amorim, de Brito e Evangelista (2012) utilizaram resíduos de concreto graúdos. No quesito densidade os valores encontrados para os RCD demonstram-se abaixo dos deparados para os AN, sendo eles, respectivamente, 2,31 g/cm³ e 2,51 g/cm³.

Bhutta *et al.* (2013) relatam que a massa específica dos agregados reciclados (2,34 g/cm³) é menor que a dos agregados naturais (2,55 g/cm³). A diferença totaliza 8,9%.

Em pesquisa que avaliou apenas o uso de ARCD cerâmicos, Zhang e Zong (2013) avaliaram tanto a massa específica quanto a unitária dos agregados. Em comparação com o AN o RCD é menos denso nos dois quesitos, os valores encontrados são 1,65 g/cm³ e 2,86 g/cm³ para massa específica e 0,83 g/cm³ e 1,58 g/cm³ para massa unitária.

Kou e Poon (2012b) também encontraram densidades menores para os agregados graúdos reciclados de concreto em comparação aos agregados de granito, onde os valores são, respectivamente, 2,35 g/cm³ e 2,62 g/cm³.

Em trabalho realizado por Zhu *et al.* (2013), encontra-se valores que confirmam a menor massa específica dos agregados reciclados. O RCD, graúdo e adquirido em usinas de reciclagem, obteve valor de 2,38 g/cm³ enquanto que a medida para o AN foi de 2,66 g/cm³.

Corinaldesi e Moriconi (2009) encontram resultados que comprovam que os RCD têm densidade aparente menor que os agregados naturais. Trabalhado com agregados finos os resultados foram de 2,62 g/cm³, para o AN, e de 2,15 g/cm³, para o RCD, os grossos apresentaram valores de 2,68 g/cm³, para o AN, e 2,32 g/cm³, para o RCD.

b) Porosidade

Com relação à porosidade dos agregados reciclados Kou, Poon, e Etxeberria (2011), ao avaliarem a porosidade por intrusão de mercúrio, encontraram valores de 8,46% para o ARC e 1,62% para o agregado natural granítico.

Gómez-Soberón (2002) encontrou valores de porosidade total maiores para RCD graúdos em relação aos AN. Os agregados naturais apresentaram valores de porosidade de 2,82% enquanto que os resíduos atingiram valores de 14,86%

Kou e Poon (2012b) descreveram a porosidade por intrusão de mercúrio de RCD de concreto obtidos em obras de demolição. Os resultados apontam que a porosidade dos agregados reciclados é de 8,46% enquanto que dos agregados naturais, oriundos de rochas graníticas, é de 1,62%.

Thomas *et al.* (2012) relatam uma maior porosidade advinda dos agregados reciclados em relação aos naturais, os ensaios realizados indicam uma porosidade de 4,70% e 12,30% para os AN e RCD, respectivamente.

Novamente, Kou e Poon (2012a) encontraram valores superiores de porosidade para os RCD em comparação aos AN. Enquanto o resultado da intrusão de mercúrio para os RCD foi de 8,69% para os AN foi de 1,62%.

Abbas *et al.* (2009) relatam resultados semelhantes aos das demais pesquisas apresentadas no que diz respeito à porosidade. Os valores encontrados, para duas fontes distintas de RCD, são de 12,3% e 8,1%. No caso de agregados naturais os valores são de 0,9% para rocha calcária e 2,4% para cascalho de rio.

c) Absorção de água

Kou, Poon, e Etxeberria (2011) encontraram resultados que mostram maior absorção de RCD de concretos em relação às rochas naturais. Os valores obtidos chegam a 7,42% enquanto que para agregados naturais de granito triturado a absorção de água é de apenas 1,12%.

Nesse mesmo viés Bhutta *et al.* (2013) confirmam uma maior absorção de água por parte de agregados reciclados graúdos obtidos em usinas. Os valores apontam que a absorção nos RCD é de 4,6% enquanto que nos agregados convencionais é de 1,2%.

A maior absorção de água, nos agregados reciclados, também é confirmada pelo estudo de Ferreira, Barra e Brito (2011). Os valores apontam para uma absorção 4,6% maior dos RCD (5,8% de absorção) em relação aos agregados naturais (1,2 % de absorção).

Nagataki *et al.* (2004) confirmaram que a absorção de água de RCD oriundos de concretos podem chegar a 6,27% enquanto em agregados naturais o valor é de 0,94%. Uma diferença de 5,33%

Corinaldesi e Moriconi (2009) comparam RCD, graúdos e miúdos, de usinas de reciclagem, com presença de cerâmica entre os resíduos, com agregados naturais. Os valores encontrados, no quesito absorção de água, para

os resíduos finos foram de 3%, para o AN, e de 10%, para o RCD, e para os resíduos grossos apresentaram resultados de 2%, para o AN, e 8%, para o RCD.

Em pesquisa realizada por Gómez-Soberón (2002), encontra-se valores de absorção de água de 8,16% para ARCD finos e de 1,49% para agregados finos naturais.

Trabalhando com agregados finos Zega e Di Maio (2011) observaram que a absorção de água do RCD (8,5%), em relação a areia de rio comum (0,9%), pode ser até 8 vezes maior.

Kou e Poon (2012b) demonstram que a absorção de água de RCD, originados de demolições de concreto, é em torno de 7 vezes maior que agregados de granito triturado, os valores são, respectivamente, 1,12% e 7,19%.

Zhu *et al.* (2013) trabalhando com agregados reciclados de concreto confirmaram a tendência dos RCD em absorverem mais água que os agregados naturais. Tem-se os seguintes valores: 7,6% e 0,9% para os RCD e AN respectivamente.

Por fim, Geng e Sun (2013), trabalhando com agregados finos reciclados, encontram valores de que variam de 5,9% a 7,2%, dependendo do tipo de RCD utilizado, em comparação com a absorção de 1,6% da areia de rio lavada.

2.1.1. Métodos de Tratamento e Melhoria da Qualidade dos RCD

Com intuito de aproximar as características dos agregados reciclados às propriedades dos agregados naturais, algumas técnicas de tratamento dos RCD formam desenvolvidas.

Xuan, Zhan e Poon (2016) relatam o uso de carbonatação acelerada para a melhoria das propriedades dos RCD. Características como baixa densidade, alta porosidade e alta absorção de água, que diminuem a resistência e a durabilidade do concreto, são melhoradas com o processo de carbonatação. Ao se carbonatar os agregados, a formação de CaCO_3 nos poros melhora as características dos resíduos reciclados. O tratamento de carbonatação além de aperfeiçoar características do concreto final, permite um maior índice de substituição de AN por RCD.

Ryou e Lee (2014) estudam os efeitos da impermeabilização dos RCD com superplastificantes. O policarboxilato, que quando usado como aditivo reduz o consumo de água, forma uma camada impermeabilizante ao redor dos agregados. Os resultados encontrados indicam uma absorção de água de 2,35% por parte

dos RCD comuns e de 0,72% pelos RCD revestidos pelo aditivo já com relação a massa específica os valores encontrados são de 2,55 g/cm³ e de 2,62 g/cm³ respectivamente. Com a superfície impermeabilizada diminuiu-se a absorção e densificou-se o RCD, contudo problemas de aderência agregado matriz puderam ser constatados com o uso desses resíduos como agregado de concreto.

2.2. Concretos com Resíduos de Construção e Demolição

De acordo com o exposto na seção 2.1. Resíduos de Construção e Demolição, os RCD possuem características distintas dos agregados naturais. A consequência disso é uma alteração das propriedades dos concretos fabricados com esse tipo de agregado. Entender o comportamento dos concretos com presença de RCD é fundamental para um uso seguro desses agregados alternativos.

É grande o número de variáveis presentes em estudos sobre características de concretos com utilização de ARCD. Na presente fundamentação teórica deu-se preferência para trabalhos onde houve a substituição do AN graúdo e a fabricação de concretos estruturais. As características apresentadas pelos concretos com RCD estão fortemente ligadas às variáveis de pesquisa adotadas. A Tabela 1 indica algumas dessas variáveis adotadas em cada um dos estudos abordados.

Tabela 1: Principais variáveis adotadas nos estudos abordados.

(Continua)

Referências	Tipo de RCD	Grau(s) de Substituição do AN por RCD	Classe de resistência (MPa)	Pré saturação dos agregados	Fator A/C	Adição Mineral	Aditivo
Richardson, Coventry e Graham (2009)	ARM	100%	35	Não	0,55	Não	Não
Richardson, Coventry e Bacon (2011)	ARC	100%	20	Sim	0,80	Não	Incorporador de ar
Etxeberria, Vázquez e Barra (2007)	ARC	0, 25, 50 e 100%	25	Sim	0,52; 0,50	Não	Superplastificante
Kou, Poon e Etxeberria (2011)	ARC	20, 50 e 100%	40	Sim	0,55	Não	Não
Bhutta <i>et al.</i> (2013)	ARC	100%	20	Sim	0,30	Não	Polímeros
Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001)	ARC	100%	20, 45, 65	Sim	0,70; 0,73; 0,74; 0,76	Escória de alto forno	Superplastificante

(Conclusão)

Angulo <i>et al.</i> (2009)	ARM	40%	20, 30, 40	Sim	0,4; 0,5; 0,67	Não	Não
Kou e Poon (2012b)	ARC	50 e 100%	45	Não	0,55	Cinzas volantes	Não
Kou e Poon (2012a)	ARC	20, 50 e 100%	45	Não	0,55; 0,42	Cinzas volantes	Não
Corinaldesi e Moriconi (2009)	ARM	100%	30	Não	0,35; 0,40; 0,56	Microsílica e cinzas volantes	Não
Thomas <i>et al.</i> (2012)	ARC	20, 50 e 100%	Diversas	Em alguns traços	0,45; 0,50; 0,55; 0,65	Não	Não
Matias <i>et al.</i> (2014)	ARC	25, 50 e 100%	35	Não	0,42; 0,45; 0,48	Não	Superplastificante
Limbachiya (2004)	ARM	20, 30, 50 e 100%	20, 30, 40	Não	Vários	Não	Não
Ferreira, Barra e De Brito (2011)	ARC	20, 50 e 100%	55	Sim	0,5	Não	Não
Zhu <i>et al.</i> (2013)	ARM	100%	45	Não	0,5	Não	Silanos
Zega e Di Maio (2011)	ARC	20 e 30%	40	Não	0,45	Não	Superplastificante
Pedro, de Brito e Evangelista (2014)	ARC	100%	20, 45 e 65	Não	Vários	Não	Superplastificante (em alguns traços)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

2.2.1. Características do Concreto Fresco

Devido à alta porosidade e absorção de água, características comuns nos ARCD, é muito corriqueira a alteração de características do concreto em estado fresco, principalmente no que tange a trabalhabilidade. O agregado reciclado, por ser mais absorvente, tende a reter uma maior quantidade de água da mistura, diminuindo assim a trabalhabilidade (ANGULO, 2005; GENG; SUN, 2013; LIMBACHIYA, 2004; RYOU; LEE, 2014; ZHANG, S.; ZONG, 2013). Outros fatores como a pré-saturação dos agregados, a quantidade de resíduos utilizados e o uso de aditivos podem ter grande influência sobre a trabalhabilidade dos concretos fabricados com RCD.

A pré-saturação dos agregados tem grande importância na trabalhabilidade do concreto, RCD pré-molhados tendem a absorver menor quantidade de água da mistura e assim melhoram a trabalhabilidade do concreto. Ferreira, Barra e De Brito (2011) e Etxeberria, Vázquez e Barra (2007) utilizam técnicas de pré-saturação dos RCD em seus estudos.

Ferreira, Barra e De Brito (2011) relatam que a utilização de técnicas de pré-molhagem dos RCD aumentou a trabalhabilidade dos concretos. Foi possível reduzir a variabilidade dos resultados do *Slump*, os mesmos variaram de 70 mm a 90 mm, sendo que o concreto de referência sem RCD atingiu valor de 79 mm. Etxeberria, Vázquez e Barra (2007) relatam a necessidade de utilizar RCD saturados, caso contrário haveria perda de trabalhabilidade do concreto fresco como também do controle da relação A/C efetiva da mistura.

A utilização de aditivos também é um fator considerável ao se tratar de trabalhabilidade de concretos com agregados reciclados. Matias *et al.* (2014) confirmam o acréscimo do abatimento do tronco de cone causado por aditivos superplastificantes (SP I à base de polímeros orgânicos e SP II à base de policarboxilato). Dentre os concretos com uso dos aditivos quanto maior o teor de substituição dos AN por RCD menor a trabalhabilidade. Contudo, quando comparados aos concretos com RCD e sem aditivos, é relevante a melhoria de desempenho.

Utilizando aditivo à base de Silano, Zhu *et al.* (2013) relatam melhora dos resultados obtidos nos *Slumps Tests* das misturas com e sem RCD. Esse tipo de aditivo, por ser hidrorrepelente, aumenta a quantidade de água livre na mistura, sendo assim, a medida do abatimento do tronco de cone se equivale para concretos convencionais e reciclados. Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001), no intuito de fixar a trabalhabilidade (80 ± 15 mm) de concretos com e sem agregado reciclado, utilizaram diferentes teores de superplastificante à base de lignosulfonatos.

Por apresentarem características diferentes dos AN, os RCD alteram a trabalhabilidade do concreto de acordo com seu teor de utilização. Zega e Di Maio (2011) relatam diminuição dos resultados do *Slump* com o acréscimo da substituição do agregado natural pelo reciclado fino. Os resultados foram: 85 mm para o concreto de referência, 70 mm com o uso de 20% de RCD e 35 mm para o uso de 30% de RCD.

Limbachiya (2004) relata uma diminuição do abatimento do tronco de cone com o aumento do teor de substituição de agregado natural por resíduos e com o aumento da resistência de referência do traço – 20, 30, 35 ou 40 MPa. Os concretos foram todos projetados para um *Slump Test* de 75mm (± 25 mm), a título de exemplificação o concreto de 20 MPa variou os resultados de 90 mm, para o concreto sem RCD, até 65 mm, para o concreto com 100% de RCD.

Outros fatores ainda podem afetar a trabalhabilidade dos concretos. De acordo com Angulo (2009) a densidade do RCD influencia nos resultados do *Slump Test*. Com o uso de agregados reciclados segregados por faixas densimétricas, o autor informa que: os resultados do *Slump* foram maiores nos concretos com RCD mais densos, isso se deve ao fato dos mesmos serem menos absorventes, retirando assim menos quantidade de água do traço.

Percebe-se que os resultados obtidos pelos trabalhos expostos para o abatimento do tronco de cone podem divergir, com a diminuição ou manutenção da trabalhabilidade com o uso de agregados reciclados. Diversos fatores afetam a trabalhabilidade do concreto – teor de substituição, uso de aditivos, pré-saturação dos RCD – esses devem ser observados tanto na dosagem quanto na moldagem.

2.2.2. Características do Concreto Endurecido

As características dos concretos endurecidos também são afetadas pelas variáveis de pesquisa expostas na Tabela 1.

O teor de substituição do AN por RCD tem influência sobre a resistência à compressão do concreto. Kou e Poon (2012b), indicam perda de resistência à compressão com o aumento de RCD na mistura, aos 10 anos têm-se: 67,50 MPa para o concreto referência e 57,50 MPa e 52,2 MPa para os concretos com 50% e 100% de RCD respectivamente. Novamente Kou e Poon (2012a) relatam efeitos negativos da adição de RCD em substituição ao AN. Em teores de 20, 50 e 100% os resíduos causaram diminuição de resistência em concretos com mesma relação A/C.

Thomas *et al.* (2012) relatam que em baixos teores de substituição a perda de resistência é pouco significativa, quando a substituição aumenta a perda de resistência cresce. Limbachiya (2004) expõe que com um mesmo fator A/C, concretos com mais de 30% de RCD apresentavam menor resistência à compressão, enquanto que os traços com 20% de RCD apresentavam desempenhos semelhantes à referência. De acordo com o autor, concretos com 30%, ou mais, de RCD mostraram-se mais rijos, menos coesos e menos resistentes.

Etxeberria, Vázquez e Barra (2007) estudaram os efeitos da quantidade de RCD no concreto. Em uma primeira fase do estudo, onde manteve-se o fator A/C constante, os resultados são concretos reciclados com 20 a 25% menos resistência à compressão que a referência. Na segunda fase, onde há

compensação de água e cimento, atinge-se uma mesma resistência a compressão para todos os concretos.

Com relação à absorção de água e porosidade, a taxa de utilização do RCD apresenta-se como variável importante. O RCD, mais poroso e com maior absorção que o AN, pode transferir suas características ao concreto que o utiliza. Levy e Helene (2004) afirmam que em concretos com até 20% do AN substituído por RCD é possível obter baixa porosidade e absorção de água. Acima desse teor, quanto mais resíduos, maior a porosidade e absorção de água. Gomez-Soberón (2002), ao testar a porosidade por intrusão de mercúrio, relatou que quanto maior a quantidade de resíduos substituindo agregados naturais, maior a porosidade, na interface do agregado, do concreto endurecido, essa tendência é mais presente em idades mais jovens.

Kou e Poon (2012b) apontam aumento da absorção de água por capilaridade proporcional ao teor de substituição de AN por RCD na mistura. Gomes, de Brito e Bravo (2009) relatam aumento da absorção de água para traços com adição de resíduos de concreto ou resíduos mistos, quase linearmente proporcionais à taxa de incorporação de materiais reciclados. Thomas *et al.* (2012) apontam aumentos, na absorção por imersão e porosidade, em todas as idades, proporcionais à substituição dos AN por RCD.

Limbachiya (2004) relata um aumento de absorção de água em concretos reciclados com substituições maiores que 20%, isso se justificaria devido à porosidade excessiva advinda da argamassa aderida aos resíduos. Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001) relatam absorção de água de 5% em concretos com AN, enquanto traços com RCD apresentam absorção de água mínima de 7%.

Uma opção para tentar diminuir possíveis efeitos deletérios da substituição do AN por RCD é o uso de aditivos. Matias *et al.* (2014) relatam a resistência à compressão do concreto com RCD foi muito similar ao grupo controle. Isso se deve ao uso de aditivos que deixam a mistura mais compacta e compensam a perda de resistência advinda do uso de agregados reciclados. O mesmo estudo aponta valores de absorção de 13,7% para o concreto de referência e 17,2% e 17,5% para concretos com agregados reciclados.

Zhu *et al.* (2013) averiguam a utilização de aditivos a base de silano, e expõem que a resistência à compressão é 18% menor no concreto com RDC. Em ambos os casos, com e sem RDC, quando incorporado a mistura o silano diminuiu a resistência do material. Bhutta *et al.* (2013) relatam que a adição de polímeros

comerciais (borracha de butadieno estireno e emulsão de látex, 3% e 5% da massa do cimento) não são suficientes para tornar o desempenho do concreto com RCD similar ao concreto referência.

As adições minerais utilizadas também são fatores que influenciam na performance dos concretos com RCD. Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001) trabalham com traços com e sem presença de escória de alto forno, ensaios de resistência à compressão e tração, realizados aos 7, 28, 100 e 365 dias, apontam que apenas o concreto com escória se destaca, sendo que os demais, independentemente da presença de RCD, apresentam desempenhos similares.

Com o uso de micro sílica e cinzas volantes, Corinaldesi e Moriconi (2009) relatam que em ensaios ocorridos aos 1, 3, 7, 14, 28 e 56 dias, o traço apenas com RCD apresentou os piores resultados, os com cinzas e resíduos obtiveram resultados semelhantes à referência, já o traço com adição de micro sílica e RCD teve desempenho superior ao concreto com agregado natural. Esses bons resultados justificam-se pelo efeito de densificação e pela atividade pozolânica das adições minerais. Nesse mesmo trabalho, Corinaldesi e Moriconi (2009) expõem que a porosidade, aos 28 dias, é maior em concretos com RCD e sem cinzas volantes. Os valores encontrados para misturas com RCD e cinzas volantes indicam que o uso de cinzas é positivo no que tange à porosidade total dos CP.

Richardson, Coventry e Bacon (2011) indicam que o uso de agregados reciclados de alta qualidade fez com que a resistência à compressão, aos 6 dias, dos concretos reciclados fosse maior. Os valores encontrados são de 12,8 MPa para o concreto referência e 15,4 MPa para o reciclado, no caso do uso das fibras os resultados são 11,8 MPa para o referência e 14,9 MPa quando há o uso de ARCD.

Pedro, de Brito e Evangelista (2014) compraram RCD de diferentes qualidades. Os agregados reciclados tiveram como origem concretos de 20, 45 e 65 MPa. O estudo demonstra que quanto maior a resistência dos concretos que originaram os RCD maior a resistência do concreto fabricado com os mesmos. No caso da absorção por imersão, a incorporação de agregados reciclados diminuiu a performance dos concretos em 50, 35 e 27%, dependendo da resistência do concreto que deu origem ao RCD.

A respeito da resistência à tração, Etxeberria, Vázquez e Barra (2007); Kou, Poon e Etxeberria (2011); Limbachiya (2004); Kou e Poon (2012b) e Zhang

e Zong (2013) apontam que o uso de RCD em substituição ao AN não influencia a performance do concreto fabricado e em alguns casos pode até melhorar o desempenho. Hipóteses levantadas que justificam esse comportamento são: melhorias na microestrutura do concreto, principalmente na ZTI, e uma menor sollicitação dos RCD, em comparação à compressão, nos ensaios de tração.

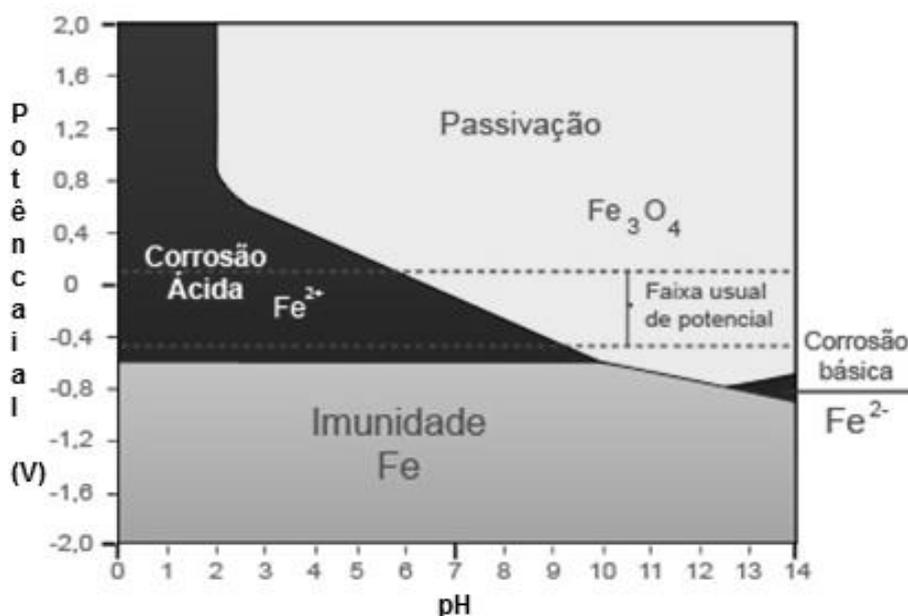
2.2.3. Efeitos do RCD em Características Relacionadas à Durabilidade dos Concretos Reciclados

a) Avanço da Frente de Carbonatação em Concretos Reciclados

O avanço da frente de carbonatação consiste na difusão do CO_2 pelos poros do concreto e a conseqüente despassivação das armaduras do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2013; PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007; RIPPER; SOUZA, 1998; SCHNEIDER, 2003)

Qualquer ambiente com pH menor que 12,5 é considerado hostil para concretos e matrizes cimentícias, sendo um ambiente mais propício a corrosão das armaduras do concreto. A Figura 1 demonstra um diagrama onde é possível visualizar o perigo de corrosão das armaduras de ferro, principalmente com pH abaixo de 9. É interessante ter-se em vista que esse gráfico foi formulado para temperatura de 25 °C e que uma faixa usual de potencial de corrosão da armadura do concreto é da ordem de +100 mV a - 400 mV (CUNHA; HELENE, 2001; MEHTA; MONTEIRO, 2013).

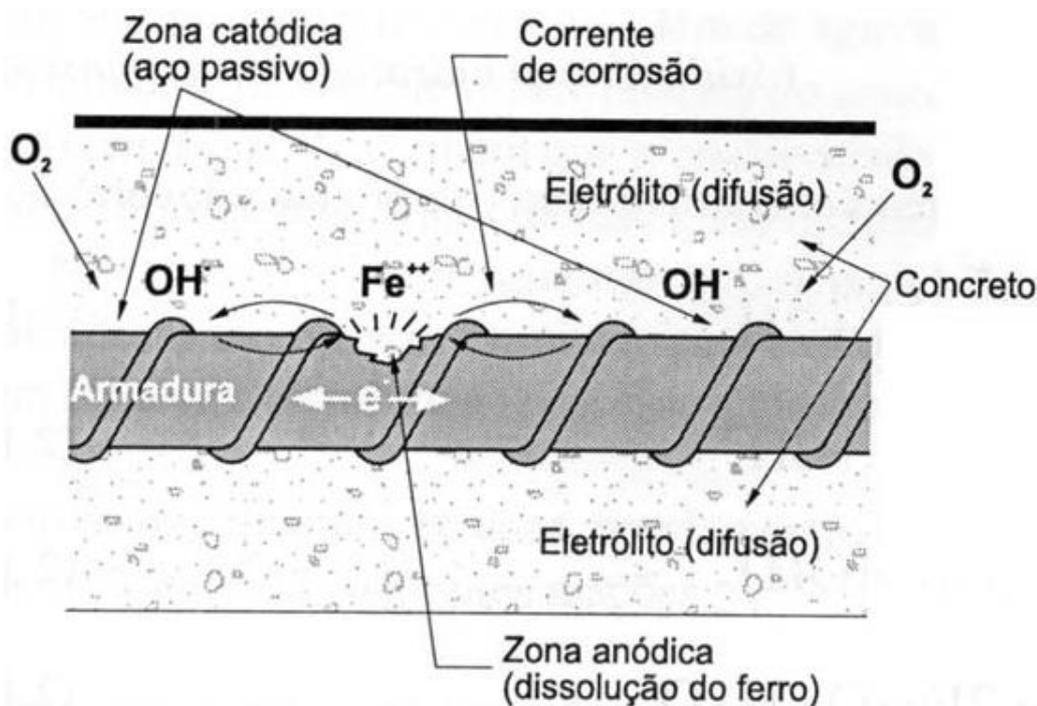
Figura 1: Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico.



Fonte: Pourbaix (1976 *apud* CUNHA e HELENE, 2001).

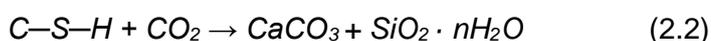
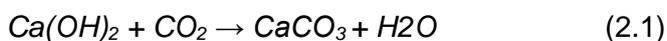
A Figura 2 exemplifica, de maneira sintética, o processo de corrosão da armadura de aço do concreto armado.

Figura 2: Processo de corrosão da armadura do concreto.



Fonte: Cunha e Helene (2001).

A carbonatação do concreto contribui com a corrosão das armaduras de aço uma vez que diminui o pH do meio. Após difusão no concreto, o CO_2 reage com produtos da hidratação do cimento – como o C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado) e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de Cálcio), principalmente – e diminui a alcalinidade do concreto. De acordo com Ripper e Souza (1988), Cunha e Helene (2001) Werle, Kazmierczak e Kulakowski (2011) e Zhang *et al* (2015) as principais reações de carbonatação são:



A profundidade de carbonatação, ocorre a partir da superfície e avança para as partes mais internas do concreto, forma-se assim a “frente de carbonatação”. Essa separa duas regiões com diferentes pH, uma próxima a 13 e outra que gradualmente se aproxima de 8 (CUNHA; HELENE, 2001; MEHTA; MONTEIRO, 2013; PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007).

O fenômeno da carbonatação ocorre naturalmente, contudo pode ser acelerado por diversos fatores. Dentre eles, pode-se citar: temperatura,

concentração de CO₂ no meio, umidade relativa, relação água/cimento (A/C), tipo de cimento e, finalmente, o tipo de agregado (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007; RIPPER; SOUZA, 1998; SILVA *et al.*, 2015; WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011).

Com o processo de carbonatação do concreto instalado e a conseqüente corrosão das armaduras. Problemas, advindos da corrosão das armaduras por carbonatação, manifestam-se sob a forma de: expansão, fissuração, destacamentos do revestimento, perda da aderência e redução da seção da armadura. Com isso, muitas vezes, a estrutura não é capaz de suportar os esforços aos quais ela foi dimensionada e tem sua vida útil reduzida (CUNHA; HELENE, 2001; MEHTA; MONTEIRO, 2013; PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007; RIPPER; SOUZA, 1998)

O método usualmente utilizado para aferir a carbonatação do concreto é o da fenolftaleína, após a aspersão do líquido a parte carbonatada (pH reduzido) permanece na cor natural (PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA, 2009; RILEM, 1988; WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011). O Brasil ainda não conta com Norma regularizando o ensaio, em geral trabalha-se com normas e recomendações estrangeiras, a francesa "*RILEM CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth*" (1988) e a chinesa "*GB/T 50082 Standard for Test Methods of Long-term Performance and Durability of Ordinary Concrete*" (2009) são exemplos.

A seguir uma série de estudos onde avaliou-se as conseqüências da adição de resíduos de demolição e construção no avanço da frente de carbonatação em concretos. A Tabela 2 compara as características e resultados de carbonatação de cada um dos estudos abordados.

Tabela 2: Comparação entre os estudos de carbonatação apresentados

(Continua)

Referência	Grau(s) de Substituição do AN por RCD e fator A/C utilizado	Tempo de exposição à carbonatação acelerada e parâmetros da câmara	Conclusão sobre os efeitos do uso de RCD sobre o avanço da frente de carbonatação
Werle, Kazmierczak e Kulakowski (2011)	0, 25,50,75 e 100 %; 0,43 0,56 e 0,85	147 dias, UR 70% e CO ₂ 1%	À medida que a qualidade dos resíduos diminui e o teor de substituição aumenta, o concreto reciclado se torna menos resistente ao avanço da frente de carbonatação.

(Continuação)

Amorim, Brito e Evangelista (2012)	0, 20, 50 e 100%; 0,43	90 dias, 20 °C, UR 60% e CO ₂ 5%	O concreto com RCD é sempre menos resistente à carbonatação que o concreto referência. O avanço da carbonatação é proporcional ao teor de substituição dos AN.
Matias et al. (2014)	0, 25, 50 e 100%; 0,42, 0,45 e 0,48	7, 14, 21, 28, 56 e 91 dias	Em idades jovens, a adição de superplastificantes em concretos reciclados não altera o desempenho dos mesmos, eles são menos resistentes ao avanço da frente de carbonatação. Em idades mais avançadas, o uso de SP II proporciona um desempenho semelhante ao concreto referência.
Abbas et al. (c2009)	0, 63,5, 74,3 e 100%; 0,45	7, 21, 35, 56, 84, 112 e 140 dias, 23 °C, UR 60% e CO ₂ 3%	Adição de cinzas e RCD são prejudiciais. Esse prejuízo é proporcional à substituição. O método de dosagem proposto pelos autores também piora a resistência à carbonatação do concreto avaliado.
Otsuki, Yodsudjai e Miyazato (2003)	0 e 100%; 0,25, 0,40, 0,55 e 0,70	28 dias, 40 °C, UR 70% e CO ₂ 10%	O avanço da frente de carbonatação é diretamente proporcional ao fator A/C. O aumento do teor de substituição dos agregados naturais pelo RCD também é prejudicial à durabilidade dos concretos reciclados.
Zhang e Zong (2013)	0, 30, 40 e 50%; 0,5	28 e 56 dias, 20 °C, UR 70% e CO ₂ 20%	A performance do concreto piora muito com a adição de RCD, essa perda de resistência à carbonatação é proporcional a substituição de AN por RCD.
Kou e Poon (2012)	0, 50 e 100%; 0,55	28 dias, 1, 3, 5 e 10 anos*	A carbonatação no concreto reciclado foi maior tanto com adição de RDC quanto com a de cinzas volantes.
Xiao, Lei e Zhang (2012)	0, 30, 50, 70 e 100%; 0,35, 0,40, 0,50, 0,60 e 0,70	7, 14, 28 e 80 dias, 20 °C, UR 70% e CO ₂ 20%	Até a substituição de 70% do AN por RCD a carbonatação aumenta, com a substituição de 100% temos uma melhora do desempenho, no entanto o autor recomenda mais estudos. Quanto mais resistente a origem do RCD em estudo menor é o avanço da frente de carbonatação. A presença de cerâmica piora o desempenho.
Levy e Helene (2004)	0, 20, 50 e 100%; 0,45, 0,55 e 0,75	28 dias	Álcalis advindos do cimento extra contribuíram para uma desaceleração no avanço da frente de carbonatação nos concretos com RCD. Assim, é possível explicar as razões pelas quais as substituições de 20 e 50% e 100% (alguns casos) tiveram desempenhos melhores, em relação à resistência à carbonatação, que o concreto de referência.

(Conclusão)

Thomas <i>et al.</i> (2012)	0, 30, 50, 60, 70 e 100%; 0,45, 0,50, 0,55 e 0,65	7, 14, 21, e 28 dias, 30 °C, UR 60% e CO ₂ 10%	Com um fator A/C constante, há um aumento na taxa de avanço da frente de carbonatação proporcional ao fator de substituição do AN por RCD.
Corinaldesi e Moriconi (2009)	0 e 100%; 0,35, 0,40 e 0,56	-	O ensaio de avanço da frente de carbonatação foi fortemente dominado pela relação A/C. O traço com menor quantidade de água, o com apenas RCD, apresentou os melhores resultados. Os piores resultados são referentes ao traço com maior quantidade de água, o traço de referência.
Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001)	0 e 100%; 0,70, 0,73, 0,74 e 0,76	CO ₂ 4%	Os ensaios demonstram que os concretos, em ordem decrescente de resistência à carbonatação, são: o concreto com RCD e 5% a mais de cimento comum, o de referência, o com cimento com escória de alto-forno e RCD e, por último, o concreto com RCD e cimento comum.
Eguchi <i>et al.</i> (2007)	0, 30, 100%; 0,60	182 dias	A carbonatação, não sofre grandes alterações com relação ao concreto com agregado natural quando há uso de agregados reciclados.
Gomes e Brito (2009)	6,25, 12,5, 25 e 50%; 0,43	7, 28, 56 e 90 dias, CO ₂ 5%	Não há grandes diferenças entre os concretos tradicionais e os reciclados, em alguns casos o concreto com RCD apresenta desempenho superior

*A carbonatação ocorreu sob atmosfera de Hong Kong.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

- i. Relatos de perda de resistência ao avanço da frente de carbonatação com o uso de RCD como agregado

A qualidade, quantidade e tipo de RCD utilizado têm forte influência no avanço da frente de carbonatação. Werle, Kazmierczak e Kulakowski (2011) expõem que a velocidade da frente de carbonatação está ligada à porosidade dos RCD. Essa, por sua vez, está relacionada com a qualidade e origem dos resíduos. À medida em que as resistências dos concretos de origem dos RCD diminuem, maior é o avanço da frente de carbonatação. Zhang e Zong (2013) utilizam cerâmica vermelha como agregado e concluem que é forte a influência negativa desse tipo de agregado no avanço da carbonatação. Em traços que continham até 50% de cerâmica e até 20% de cinzas volantes observou-se um grande aumento na taxa de carbonatação do concreto. Tal taxa foi proporcional ao aumento dos

agregados reciclados. Essa mudança brusca pode ser explicada pela grande porosidade dos agregados de cerâmica.

Em um estudo com alteração de diversas variáveis (fator A/C, quantidade de aglomerante, tipo de adição mineral, presença ou não de cerâmica e a quantidade e qualidade do RCD) Xiao, Lei e Zhang (2012) demonstram que: quanto maior a relação A/C, maior a carbonatação, sendo que a partir de 0,5 o problema se acelera; com o aumento da quantidade de aglomerante tem-se uma diminuição da carbonatação; até a substituição de 70% a carbonatação aumenta, com a substituição de 100% tem-se uma melhora do desempenho, que pode ser explicada pela quantidade extra de álcalis na mistura; quanto maior a resistência do concreto que dá origem ao RCD, menor é o avanço da frente de carbonatação, sendo que a presença de cerâmica piora o desempenho.

Otsuki, Yodsudjai e Miyazato (2003) explicam que em concretos reciclados a presença de ZTI são mais acentuadas. Há zonas antigas, entre as rochas naturais e a argamassa aderida, e novas, entre os RCD e AN e a nova argamassa. Nos traços foram utilizados diferentes tipos de RCD, variando-se a resistência e a quantidade de argamassa aderida. Os resultados preliminares da carbonatação (expostos em função de um único tipo de RCD e do AN) demonstram que a resistência ao fenômeno diminui com a adição de água, além de demonstrar que para todos os fatores A/C, o avanço da frente de carbonatação foi maior nos concretos reciclados. Após os resultados iniciais adotou-se um novo método de mistura, com intuito de melhorar as características do concreto. O “Double Mixing Method” consiste em dividir em duas fases a adição de água na massa e, desta forma, tentar melhorar as características da ITZ. Essa mudança causou uma melhora de 12,3% na resistência à carbonatação do concreto com resíduos em relação ao concreto fabricado utilizando o método de mistura simples.

A utilização de aditivos e adições minerais também influenciam a performance dos concretos com RCD. Matias et al. (2014) estudaram o uso de superplastificantes em concretos com agregados reciclados oriundos de concretos. Utilizou-se no estudo um superplastificante standard (SP I) e outro de alto desempenho (SP II). Os resultados da carbonatação demonstram que, em idades jovens, a adição de superplastificantes em concretos reciclados não altera o desempenho dos mesmos, os concretos com RCD são menos resistentes ao avanço da frente de carbonatação. Em idades mais avançadas, o uso de SP II proporciona um desempenho semelhante ao concreto referência.

Abbas et al. (2009), utilizando nova técnica de dosagem intitulada: “equivalent mortar volume method” (EMV) – que garante a mesma quantidade de argamassa em concretos convencionais e com RCD – explicitam que ensaios de profundidade de carbonatação (máximo de 140 dias) apontaram melhores resultados em concretos sem a presença de resíduos e adições (cinzas volantes e escória). Com relação ao tipo de dosagem, no caso de concreto sem cinzas ou escória, a carbonatação foi maior no concreto dosado pela EMV, pois, nesse caso, há menos cimento adicionado à mistura.

Kou e Poon (2012) expuseram resultados mecânicos e de durabilidade de concretos com RCD e cinzas volantes submetidos à condição natural por até 10 anos. As cinzas foram usadas nas proporções de 25, 35, e 55. A carbonatação foi maior nos concretos com RCD em todas as datas. Esse aspecto está diretamente ligado ao nível de substituição dos agregados naturais. A incorporação de cinzas volantes trouxe piora no desempenho, o que isso pode ser resultado da baixa quantidade de hidróxido de cálcio presente nas mesmas.

Amorim, Brito e Evangelista (2012) discutem a influência do processo de cura – seja em ambiente de laboratório, ambiente externo, câmara úmida ou submersão – nas propriedades do concreto com RCD graúdo. Após 90 dias em câmara de carbonatação os ensaios mostraram que a presença de RCD intensifica o fenômeno da carbonatação. Com relação à cura, a mais favorável à resistência à carbonatação é aquela feita em ambiente externo. De acordo com os autores do trabalho, isso é explicado pelas baixas temperaturas que atenuam a difusão do dióxido de carbono no concreto.

- ii. Relatos de manutenção da resistência ao avanço da frente de carbonatação com o uso de RCD como agregado.

Levy e Helene (2004) avaliaram carbonatação em concretos com RCD mistos. Os traços foram formulados para que todos os concretos atingissem as mesmas resistências mecânicas, conseqüentemente, os traços com RCD necessitaram de maiores quantidades de cimento, o que significa uma maior quantidade de álcalis na mistura. Tendo em vista esse fato, é possível explicar as razões pelas quais as substituições de 20 e 50% - até mesmo 100%, quando reciclados cerâmicos – tiveram desempenhos melhores, em relação à resistência à carbonatação, que o concreto de referência. A presença de álcalis advindos do cimento extra contribuí para uma desaceleração no avanço da frente de carbonatação. Além disso, a argamassa contida nos RCD contém partículas de

hidróxido de cálcio que interferem na alcalinidade. Tem-se ainda uma relação proporcional entre a resistência de projeto do concreto e a resistência ao avanço da frente de carbonatação.

Thomas et al. (2012) formularam 24 traços, variando-se o fator A/C, utilizando os valores de 0,45; 0,50; 0,55 e 0,65, e a quantidade de substituição por RCD graúdo de 20, 50 e 100%. Os ensaios mostram que, com uma relação A/C constante, há um aumento na taxa de avanço da frente de carbonatação proporcional ao fator de substituição por RCD. Para baixos fatores A/C, a influência da taxa de substituição dos agregados na carbonatação foi pequena. Com o aumento da quantidade de água, aumentou-se também a diferença entre os níveis de carbonatação nos diferentes teores de substituição dos AN. Quando é avaliada uma resistência à compressão constante, os concretos com RCD levam pequena vantagem sobre os concretos de referência – isso pode ser explicado pelo fator A/C dos concretos com RCD ser menor, em tais circunstâncias.

Em outra publicação envolvendo uso de resíduos cerâmicos e cimentícios Corinaldesi e Moriconi (2009) avaliaram a adição de micro sílica e cinzas volantes em concretos com 100% de RCD, tanto graúdos quanto miúdos. A ideia central era tentar diminuir as perdas de desempenho causadas pela adição do RCD. Com relação à carbonatação, concluiu-se que os resultados do ensaio foram fortemente dominados pela relação A/C. O traço com menor quantidade de água e 100% de RCD apresentou melhores resultados com relação à carbonatação, sendo seguido pelo traço com 100% de RCD e cinzas. O traço com pior desempenho e com maior quantidade de água foi o de referência, sem a presença de RCD e adições. Pode-se citar novamente a presença de álcalis extras advindos dos RCD como a possível explicação para os resultados, mas os autores apontam o fator água/cimento como determinante.

Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001) discorrem sobre os efeitos da substituição total de AN por RCD pré-saturados. Foram utilizados dois tipos de cimento, um com e outro sem adição de escória de alto forno. Os ensaios demonstram que os concretos, em ordem decrescente de resistência à carbonatação, são: o concreto com RCD e 5% a mais de cimento comum, o de referência, o com cimento com escória de alto forno e RCD e, por último, o concreto com RCD e cimento comum. É importante frisar que entre os três últimos classificados, a diferença é pequena e chega, no máximo, a 10%.

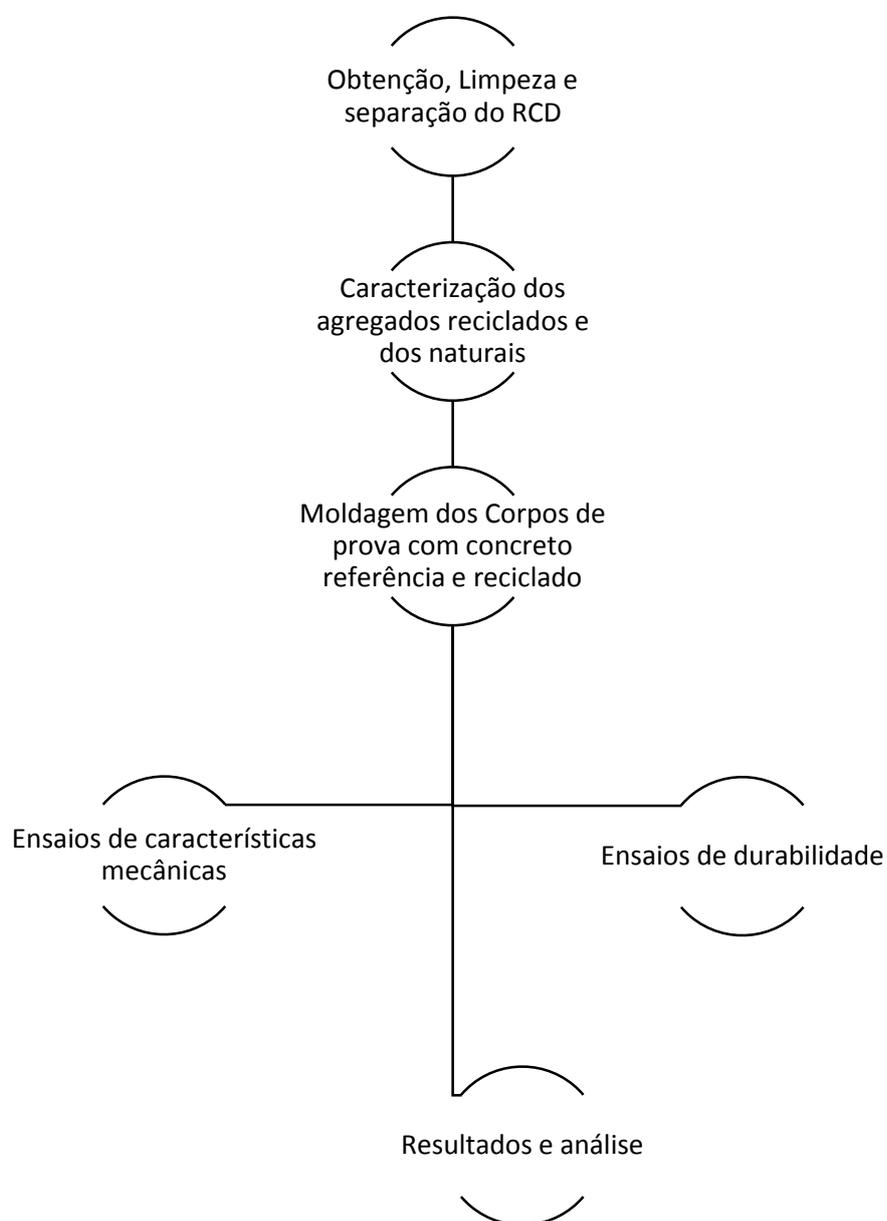
Eguchi et al. (2007) avalia os aspectos mecânicos e de durabilidade em concretos com RCD provenientes de blocos de concreto (fabricados em laboratório ou obtidos em usinas de reciclagem). As implicações desse uso apontam que os aspectos de durabilidade, inclusive a carbonatação, não sofrem grandes alterações com relação ao concreto com agregado natural, com exceção dos corpos de prova específicos de resíduos obtidos em campo.

Gomes e Brito (2009) expõem efeitos da substituição do AN por RCD formado por concreto e cerâmica fabricados em laboratório. Os resultados apontam que aos 90 dias não houve grandes diferenças de desempenho, no que tange a resistência à carbonatação, entre o concreto de referência e o com agregados graúdos como resíduos. O concreto com 50% de RCD teve, por exemplo, desempenho 10% pior que o de referência, já o com 25% de substituição do agregado natural teve performance 9% pior.

3. Materiais e Métodos

As etapas realizadas ao longo dos trabalhos experimentais estão representadas na Figura 3.

Figura 3: Organograma da pesquisa experimental



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1. Variáveis da Pesquisa

3.1.1 Variáveis de Resposta

Com intuito de se obter resultados que levem aos objetivos propostos pela pesquisa, determinou-se as seguintes variáveis de resposta dos corpos de prova moldados com e sem substituição do agregado natural por RCD.

A Tabela 3 indica as variáveis de resposta, as normas correspondentes e a quantidade e idade dos CP utilizados por ensaio.

Tabela 3: Variáveis de Resposta.

Ensaio	Norma	Número de CP por idade e formulação	Idade
Consistência pelo abatimento do tronco de cone	NBR MN 67 (1998)	-	-
Resistência à compressão	NBR 5739 (2007)	3	7 e 28
Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222 (2011)	3	28
Módulo estático de elasticidade à compressão	NBR 8522 (2008)	3	28
Absorção de água por imersão, índice de vazios	NBR 9778 (2009)	3	28
Resistividade elétrica	NBR 9204 (2012) - Adaptada	2	120
Profundidade de carbonatação	LNEC E 391(1993) e RILEM CPC-18	3	45 e 90

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.2 Variáveis de Controle

As variáveis de controle possibilitam a comparação dos resultados obtidos nas variáveis de resposta. No presente caso elas foram propositalmente controladas com intuito de se entender o efeito do uso de RCD como agregado em concretos estruturais.

1. Tipo de cimento utilizado: CP V – ARI;
2. Procedimento e tempo de cura: os CP foram deixados em cura submersa por período de 28 dias, após esse período seguiram para ensaio ou para período de sazonalidade;
3. Período de sazonalidade: 14 dias em ambiente de laboratório;
4. Teor de substituição: substituiu-se o AN por 25, 50 e 100% de RCD, substituição volumétrica;
5. Câmara de carbonatação: a carbonatação acelerada ocorreu nos seguintes parâmetros, concentração de CO₂ = 5%, umidade relativa (RH) = 65%, temperatura = 20 °C (LNEC, 1993).

3.2. Metodologia de Caracterização do Cimento

O tipo de cimento utilizado na pesquisa foi o CPV – ARI. Essa opção deu-se pelo fato do mesmo apresentar o menor teor possível de adições em sua composição química (LAFARGE, 2017).

Além dos dados fornecidos pelo fabricante, realizou-se picnometria com Gás Hélio para determinação da densidade do cimento utilizado.

3.3. Metodologia de Caracterização dos Agregados Graúdos.

Apresenta-se a seguir a metodologia utilizada para a caracterização dos agregados graúdos.

3.3.1. Obtenção, Segregação e Limpeza dos RCD

Devido à heterogeneidade de sua composição, é imperativo que o resíduo de demolição e construção passe por um processo de segregação. Esse processo pode se dar na fonte geradora – alternativa que deve ser priorizada – ou em momento posterior (AGRELA *et al.*, 2011; ANGULO *et al.*, 2009; DHIR; PAINE, 2007; HENDRIKS; NIJKERK; VAN KOPPEN, 2007; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013). No presente estudo, o RCD encontrava-se misturado, sendo assim procedeu-se a segregação das diferentes frações.

Atualmente a Prefeitura de Belo Horizonte (PBH) conta com duas estações de reciclagem de RCD – uma na BR-040 e outra na Pampulha, ambas geridas pela SLU – que juntas, em 2013, produziram 109 toneladas por dia de agregado britado reciclado (SLU, 2016). A usina onde foi obtido o resíduo, na BR-40, encontra-se em terreno público com mais de 6000 m² e iniciou suas operações em 2006 (SLU, 2016).

O resíduo de construção e demolição, utilizado no trabalho, foi obtido pelo CEFET-MG diretamente com a Superintendência de Limpeza Urbana de Belo Horizonte (SLU). Na data de coleta do material, o preço dos resíduos foi de cerca de 70 reais por metro cúbico. Este resíduo se encontrava britado, sendo necessária sua posterior lavagem e segregação.

Inicialmente os resíduos foram armazenados em barris metálicos de 200 litros. O agregado reciclado estava com grande quantidade de material fino aderido, em grande parte partículas de solo, isso somado à umidade do material que foi obtido em dias chuvosos, tornou necessária a lavagem e secagem ao sol do RCD. Outro motivo para lavagem do material foi que a segregação do mesmo, antes da limpeza, provou-se inviável, pois as partículas finas aderidas dificultaram a identificação visual dos diversos constituintes do RCD.

A lavagem do agregado foi realizada por meio de agitação do material em água. O RCD foi depositado em um vasilhame e coberto com água, os agregados e água foram agitados com o auxílio de um cabo de madeira, a água com o material fino em suspensão foi posteriormente descartada. O processo de lavagem descrito foi realizado três.

Após lavagem dos agregados reciclados foi possível realizar a segregação dos RCD. Apesar da SLU afirmar que ao adentrarem a usina os resíduos são inspecionados e segregados (SLU, 2016), os resíduos apresentavam constituição muito heterogênea e diversos contaminantes, como gesso, massa corrida e material orgânico por exemplo. Os RCD foram segregados em três classes: a primeira contendo rochas naturais e materiais cimentícios, a segunda sendo formada por cerâmicas e materiais cimentícios que por ventura estivessem aderidos à elas e a terceira uma mistura das duas anteriores classes anteriores – nessa última classe houve apenas a retirada de contaminantes.

A segregação, como demonstrado na Figura 4, ocorreu por processo de catação em mesa com fundo branco (o que facilitou o trabalho). Todo material que não se encaixou em nenhuma das três classes de agregados reciclados propostas foi descartado.

Figura 4: Agregado reciclado pronto para segregação.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com a segregação realizada, os resíduos foram novamente lavados, dessa vez em água corrente. Nessa segunda lavagem ocorreu também uma varredura a procura de materiais que deveriam ser descartados ou que deveriam estar presentes na outra classe de agregados reciclados.

O material segregado foi seco em temperatura ambiente em local coberto, arejado e com incidência de raios solares no período da tarde. A Figura 5 demonstra a plataforma de secagem dos materiais, que foram expostos à secagem por um período mínimo de cinco dias.

Figura 5: Secagem dos agregados reciclados.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Finalmente, o material seco passou por peneiramento para retirada do restante de material fino, que por ventura pudesse ter permanecido aderido, e de material pulverulento.

Ainda durante o processo de peneiramento foi realizada uma segunda varredura à procura de materiais que deveriam ser descartados ou que deveriam estar presentes em outra classe de agregados reciclados. A Figura 6 expõem amostras do agregado reciclado, (a) vermelho e (b) cinza, após finalizado o processo de limpeza e segregação do RCD.

Figura 6: Agregado reciclado lavado, segregado, seco e peneirado, RCD vermelho (a) e RCD cinza (b).



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com o fim do processo, o material foi armazenado em tambores plásticos limpos, secos e identificados. Esses tambores foram locados dentro do Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil do CEFET-MG, local protegido contra umidade e contaminações orgânicas.

3.3.2. Separação das Frações do RCD e Definição de Nomenclatura

A separação dos resíduos de construção e demolição resultou na criação de quatro classes de materiais, que de agora em diante, no escopo desse trabalho, passam a ser denominadas: Agregado Reciclado Cinza (ARC), Agregado Reciclado Vermelho (ARV), Agregado Reciclado Misto (ARM) e Resíduos Descartados. A Tabela 4 explicita a constituição de cada uma das classes.

Tabela 4: Constituição das classes de RCD.

Agregado Reciclado Cinza	Agregado Reciclado Vermelho	Agregado Reciclado Misto	Resíduos descartados
Rochas naturais	Cerâmicas vermelhas e de revestimento	Agregado reciclado vermelho	Vidro
Materiais cimentícios	Materiais cimentícios aderidos às cerâmicas	Agregado reciclado cinza	Prego
Materiais cimentícios aderidos às rochas naturais			Arame
			Plástico
			PVC
			Madeira
			Tecido
			Borracha
			Betume (Asfalto)
			Não identificados

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A proporção de ARC e ARV contidos no ARM é aquela que ocorre no material bruto, exceto contaminantes.

3.3.3. Determinação da Composição e Curva Granulométrica

A composição granulométrica dos agregados graúdos foi realizada nos padrões da normatização NBR NM 248 (ABNT, 2003b). As amostras foram lavadas, secas em estufa até atingirem constância de massa e agitadas mecanicamente por 4 minutos.

O ensaio, nos agitadores mecânicos, foi repetido duas vezes para cada um dos agregados em estudo.

3.3.4. Determinação de Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção de Água

Os resultados encontrados para a massa específica, massa específica aparente e absorção de água foram definidos de acordo com as orientações da NBR NM 53 (ABNT, 2009c). As amostras foram submersas em água por um período de 24 horas para saturação, após esse período tiveram suas superfícies secas e foram pesadas.

A segunda massa a ser aferida foi a do material submerso saturado, para tanto foi necessário aparato específico – balança e cesto. Para determinação da massa do agregado seco, a amostra passou por um período de 24 horas em estufa, com circulação de ar, a temperatura de 105 ± 5 °C, atingiu-se assim a constância de massa.

3.3.5. Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios

De acordo com os preceitos da NBR NM 45 (ABNT, 2006), procedeu-se ao ensaio para determinar massa unitária e do volume de vazios dos agregados em estudo..

Despejou-se material, limpo e seco em estufa, em recipiente, de peso e volume conhecido, até sua capacidade máxima. Nivelou-se a camada superficial pesou-se a massa do recipiente cheio.

3.3.6. Ensaio de Abrasão “Los Angeles”

Tendo em vista os procedimentos apontados pela NBR MN 51 (ABNT, 2001) realizou-se o ensaio de Ensaio de Abrasão “Los Angeles”.

Colocou-se amostra lavada, seca em estufa e pesada, em tambor juntamente com a carga abrasiva, após 500 rotações peneirou-se a amostra em peneira de 1,7mm. O material retido, Figura 7, foi lavado, seco em estufa e pesado (ABNT, 2001).

Figura 7: Material retido na peneira 1,7 mm.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.3.7. Curva de Absorção de Água dos Agregados Graúdos

O método utilizado para construção da curva de absorção foi adaptado de Leite (2001). O procedimento envolve a leitura de 30 medidas de massas submersas em diversos intervalos de tempo. O aparato utilizado no ensaio é similar ao da NBR MN 53 (ABNT, 2009c; LEITE, 2001).

Optou-se pela não realização do ensaio para os agregados naturais. O resultado da absorção dos mesmos se mostrou muito pequeno, 0,33%, em comparação aos 3 tipos de RCD.

3.4. Metodologia de Caracterização dos Agregados Miúdos

Os agregados miúdos foram caracterizados por meio das normas: NBR NM 248 (2003), NBR 9776 (1987) e NBR NM 45 (2006).

No quesito granulometria, as amostras foram secas em estufa até atingirem constância de massa e agitadas mecanicamente por 4 minutos (ABNT, 2003b). O ensaio nos agitadores mecânicos foi repetido duas vezes.

Os valores da massa unitária do agregado miúdo foram calculados segundo as orientações da NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Já a massa específica da areia foi determinada pela NBR 9776 (ABNT, 1987).

3.5. Descrição Aditivo Superplastificante

O aditivo utilizado foi fornecido gratuitamente pela empresa ERCA e a caracterização do mesmo foi obtida por meio de relatório fornecido pela fabricante. O uso de superplastificante deu-se no intuito de garantir uma trabalhabilidade adequada dos concretos fabricados. No caso, o aditivo utilizado é à base de policarboxilato.

O aditivo escolhido para ser utilizado no trabalho foi o Fluxer RMX 7000, este aditivo é um superplastificante tipo II retardador de pega (SP-II R). Os SP-II são considerados aditivos que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permitem uma elevada redução no conteúdo de água de um concreto, ou que, sem alterar a quantidade de água, aumentam consideravelmente o abatimento e a fluidez do concreto. Podem ter também efeitos de retardo (R) ou aceleração (A) de pega e serem chamados de hiperplastificantes (IBI, 2016). A Tabela 5 demonstra as características do aditivo utilizado.

Tabela 5: Descrição do superplastificante utilizado.

Nome	Tipo	Características	Aspecto Líquido	Dosagem Sugerida	Densidade (g / cm ³)
Fluxer RMX 7000	SP-II R	Redução de até 35% de água, altíssima manutenção (por horas) e boa resistência inicial	Castanho claro	0,5 a 1,0%	1,070 a 1,110

Fonte: ERCA (2016).

De acordo com o fabricante, o aditivo deve ser adicionado junto com a segunda água de amassamento com o intuito de se evitar absorção por parte dos agregados. A validade do aditivo é de 12 meses e ele deve ser armazenado em local seco e protegido de luz (ERCA, 2016).

A dosagem do SP-II R, que se dá pelo peso do cimento consumido, foi estabelecida nos valores de 0,6% para concretos sem adição de agregados reciclados e de 1,0% para agregados com uso de ARCD. Essa dosagem foi definida tendo em vista os resultados de Slump obtidos em moldagens preliminares.

3.6. Metodologia de Preparação dos Corpos-de-prova

3.6.1. Dosagem do Concreto

No escopo desse trabalho optou-se pela fabricação de um concreto cuja a resistência atendesse à maioria das construções usuais no contexto dos empreendimentos brasileiros.

O método de dosagem escolhido também levou em consideração a difundibilidade do mesmo no contexto nacional. O método escolhido foi o do *American Concrete Institute (ACI)*. Estudo comparativo demonstrou que, entre 4 métodos de dosagem – *Code Method, ACI Method, RRL Method e Surface and Angularity Index Method* – usualmente utilizados para concretos convencionais, o método que resulta em concretos reciclados com maior resistência à compressão é o do ACI (BAIRAGI; VIDYADHARA; RAVANDE, 1990).

De acordo com a NBR 6118 (2014) o concreto em questão é de Classe 2. Isso implica que o mesmo está apto a ser utilizado em ambientes urbanos, externos, que passam por ciclos de molhagem e secagem. Essa classe de concreto deve ainda apresentar fator A/C menor que 0,60 e cobrimento das armaduras maior que 25 mm (ABNT, 2014).

A Tabela 6 expõe o traço definido para o concreto em estudo. Já a Tabela 7 expõem os consumos de cada material por metro cúbico de concreto.

Tabela 6: Dosagem do concreto.

	Cimento	Areia	Brita	Água	
Traço		1	2,16	2,73	0,55

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 7: Consumo de materiais.

Consumo de água (l/m³) (W)	200
Consumo de cimento (kg/m³) (C)	364
Consumo de agregados graúdos (kg/m³) (B)	994
Consumo de agregados miúdos (kg/m³) (A)	785

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os agregados naturais foram substituídos em volume pelos agregados reciclados, isso se deve ao fato de por terem uma densidade menor, ao serem substituídos usando a massa eles ocupariam um volume maior na mistura (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2013).

Os agregados reciclados substituíram 25, 50 e 100% dos naturais. Adotar-se-á daqui em diante a sigla presente na Tabela 8 para cada um dos traços fabricados.

Tabela 8: Siglas adotadas para os traços fabricados.

Traço fabricado	Sigla adotada
Concreto referência	CR
Concreto Reciclado com 25% de agregado cinza	25% ARC
Concreto Reciclado com 50% de agregado cinza	50% ARC
Concreto Reciclado com 100% de agregado cinza	100% ARC
Concreto Reciclado com 25% de agregado misto	25% ARM
Concreto Reciclado com 50% de agregado misto	50% ARM
Concreto Reciclado com 100% de agregado misto	100% ARM
Concreto Reciclado com 25% de agregado vermelho	25% ARV
Concreto Reciclado com 50% de agregado vermelho	50% ARV
Concreto Reciclado com 100% de agregado vermelho	100% ARV

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.6.2. Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova

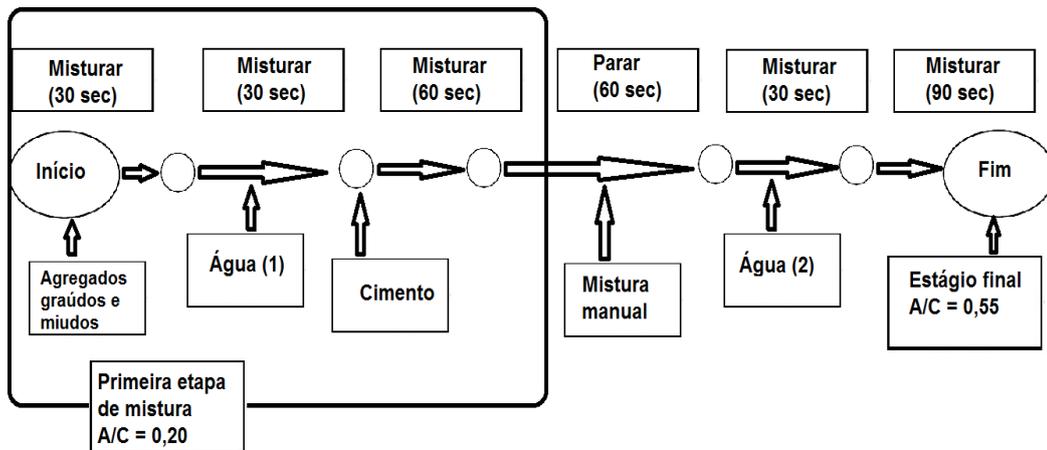
A moldagem dos CP de 10 x 20 cm foi realizada em betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 400 litros presente no laboratório do CEFET-MG.

O método de mistura escolhido foi o Método de Mistura Dupla (*Double Mixing Method* ou *Two-Stage Mixing*). Otsuki, Miyazato e Yodsudjai (2003) relatam melhoras na resistência mecânica e na resistência à penetração de íons cloreto e à carbonatação em concretos com agregado reciclado e relação A/C de 0,55.

Outro estudo realizado em concretos com adição de RCD indica melhora na ZTI entre o concreto e o agregado, conseqüentemente há uma melhora nas características mecânicas e na performance geral do concreto reciclado (TAM; GAO; TAM, 2005).

No método de mistura utilizado, os agregados devem ser adicionados primeiro à betoneira, após 30 segundo de mistura adiciona-se parte da água de amassamento. No início do primeiro minuto da mistura adiciona-se o cimento, após dois minutos de funcionamento a betoneira é desligada por um minuto, há então mistura manual. No religamento do equipamento acrescenta-se o restante da água, por mais dois minutos a mistura é realizada – na presente pesquisa adiciona-se o SP-II junto com a segunda água. A Figura 8 expõe o processo.

Figura 8: Método de Mistura Dupla.



Fonte: Adaptado de Otsuki, Miyazato e Yodsudjai (2003).

O adensamento dos CP foi realizado em mesa vibratória, em duas camadas de preenchimento. O capeamento dos corpos de prova foi realizado com enxofre. Os CP, desmoldados depois de 24 horas, ficaram em cura submersa, em solução saturada de hidróxido de cálcio, até a idade de 28 dias (ABNT, 2003a).

3.7. Metodologia de Caracterização do Concreto

3.7.1. Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR MN 67 (ABNT, 1998). Molde próprio para obtenção da consistência foi utilizado, o mesmo foi preenchido com três camadas de concreto fresco, cada uma delas compactada por 25 golpes de uma haste padronizada.

3.7.2. Ensaio de Resistência à Compressão

Como referência para o ensaio de resistência foi utilizada a norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm foram rompidos aos 7 e aos 28 dias de idade. A prensa utilizada é da marca EMIC com capacidade de 2000 kN.

3.7.3. Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Adotou-se a NBR 7222 (ABNT, 2011) como referência. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, o ensaio está foi realizado aos 28 dias. A prensa (com capacidade de 200 kN) utilizada encontra-se nos laboratórios do CEFET-MG

3.7.4. Determinação do Módulo Estático de Elasticidade à Compressão

Seguindo os preceitos da norma NBR 8522 (ABNT, 2008) determinou-se o Módulo de Young dos concretos fabricados. O ensaio foi realizado aos 28 dias no mesmo equipamento que realizará os ensaios de compressão.

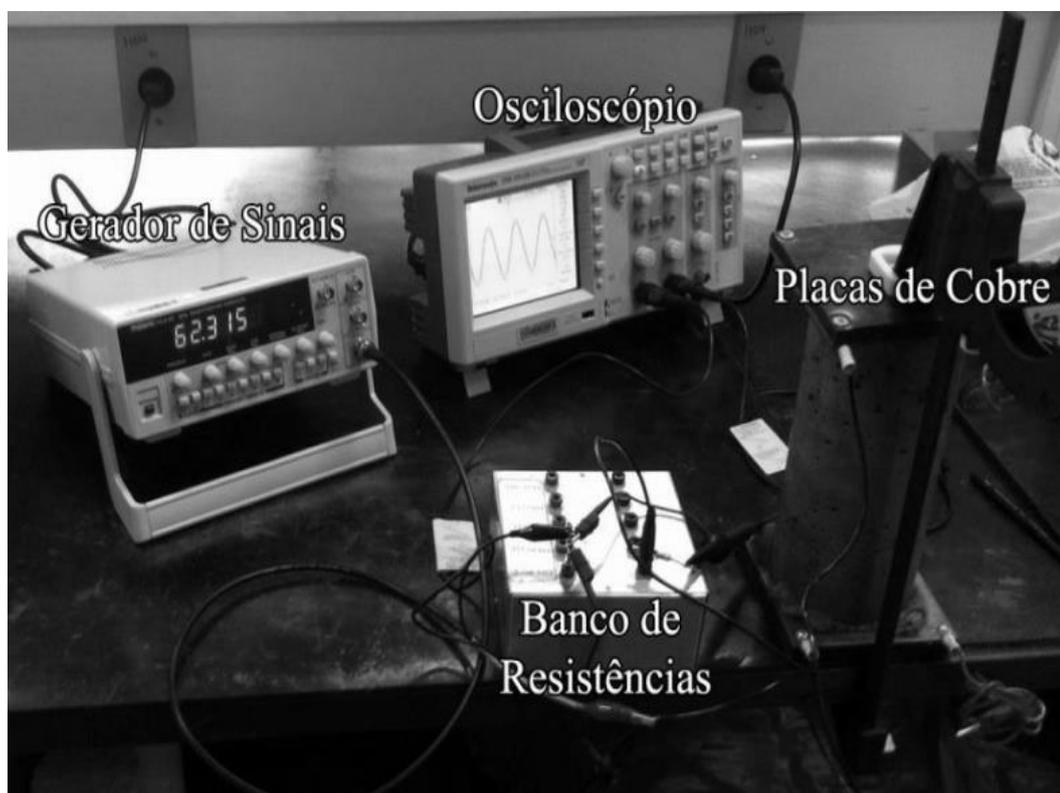
3.7.5. Ensaio de Determinação da Absorção de Água por Imersão e Índice de Vazios

Esses parâmetros se baseiam na execução de um procedimento único, o mesmo foi realizado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009b), onde os ensaios ocorreram aos 28 dias.

3.7.6. Ensaio de Resistividade Elétrica do Concreto

O ensaio realizado é uma adaptação da NBR 9204 (ABNT, 2012) formulada pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Ele utiliza método uniaxial, no qual o corpo de prova do concreto é colocado entre dois eletrodos de cobre. Entre as faces do eletrodo e do CP são utilizadas lâs de aço para uma melhor conectividade elétrica (LAGE *et al.*, 2017). A Figura 9 ilustra os aparatos necessários ao ensaio.

Figura 9: Aparato para medição de resistividade elétrica do concreto.



Fonte: Lage *et al.* (2017)

Os ensaios foram realizados aos 120 dias, os CP foram saturados em água por 48 horas antes dos ensaios. A frequência utilizada nos ensaios foi a de 40 Hz. O restante dos aparelhos utilizados nos ensaios foram: um Gerador de Sinais da Politem de modelo FG-8102, um Banco de Resistências com Resistências elétricas calibradas e um Osciloscópio da Tektronix TDS 1012B (LAGE *et al.*, 2017).

3.7.7. Ensaio de Carbonatação Acelerada

Esse ensaio não possui normatização brasileira, sendo assim as configurações da câmara de carbonatação (Figura 10) seguiram as recomendações da LNEC E 391 (1993). O ensaio de aferição da profundidade de carbonatação foi realizado de acordo com a RILEM CPC-18 (1988).

Figura 10: Câmara de carbonatação acelerada.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A câmara de carbonatação foi configura para 20 °C, umidade relativa de 65% e concentração de CO₂ de 5% (LNEC, 1993).

Os CP passaram por período de sazonalidade por 14 dias, em ambiente de laboratório. Após esse momento, o concreto foi colocado na câmara de carbonatação acelerada por períodos de 45 e 90 dias, datas onde se realizou o teste da fenolftaleína.

O ensaio com a fenolftaleína consiste na aspensão do líquido (fenolftaleína 1%) sobre a superfície do concreto previamente rompido diametralmente. As regiões do CP com pH abaixo de 8 não apresentam mudança de cor. A Figura 11 indica a cor da superfície do concreto de acordo com o pH.

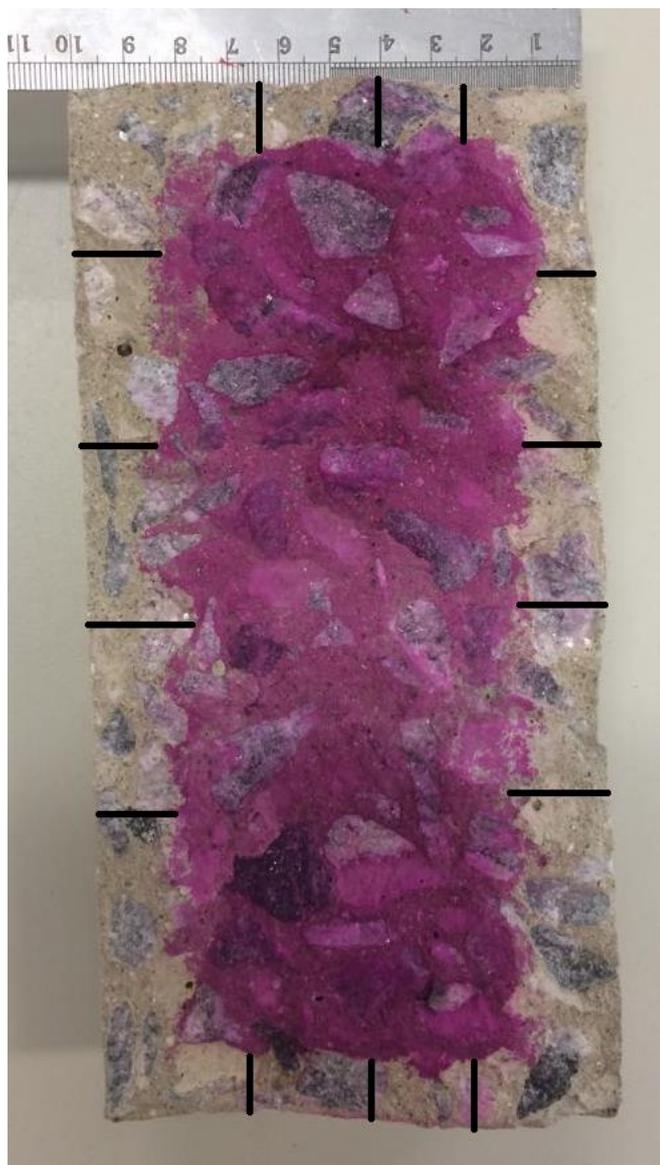
Figura 11: Coloração da superfície do concreto, após aspensão de fenolftaleína, de acordo seu o pH.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Foram aferidos 3 CP por idade e por formulação. As medições das profundidades de carbonatação foram realizadas com auxílio de um paquímetro digital, foram realizadas 14 medições por CP. A Figura 12 ilustra as localidades aproximadas e preferenciais das medições realizadas em cada um dos corpos de prova.

Figura 12: Exemplo ilustrativo das localidades preferencias para medição da profundidade da carbonatação (traços pretos).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4. Resultados

O presente capítulo visa apresentar e discutir os resultados obtidos tanto na caracterização dos materiais utilizados quanto na caracterização dos concretos fabricados.

4.1. Caracterização do Cimento

As análises químicas e físicas do cimento foram fornecidas pela empresa fabricante do cimento em relatório técnico (HOLCIM, 2017) e encontram-se no Anexo I.

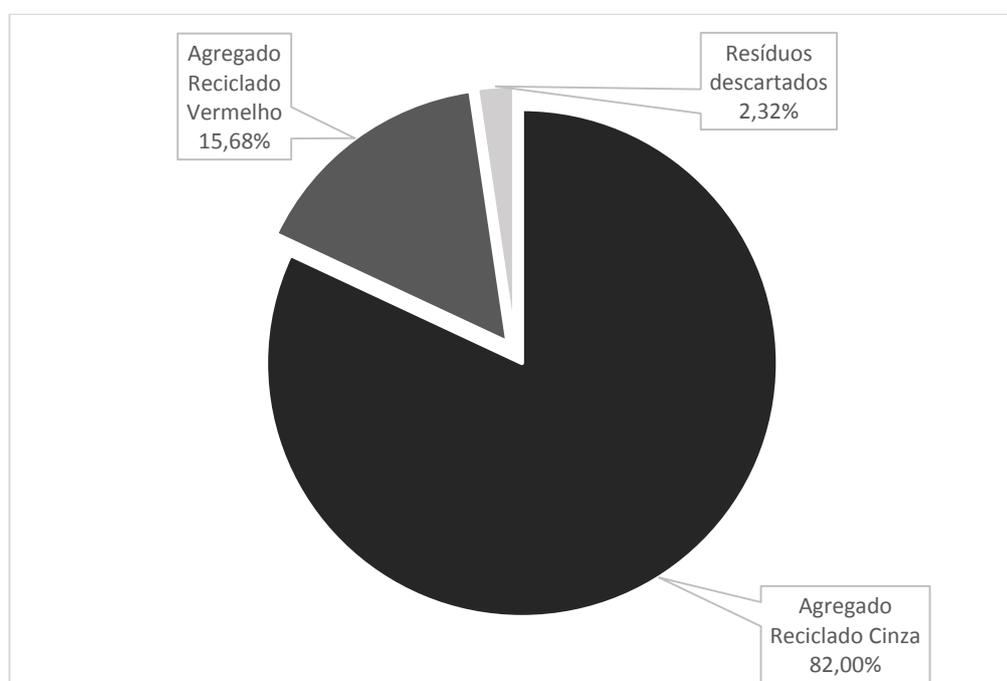
Além dos resultados fornecidos pela fabricante do material, foi realizado ensaio de picnometria de hélio. O valor da densidade encontrada para o cimento é de 2,973 g/cm³.

4.2. Caracterização dos Agregados Graúdos

4.2.1. Separação das Frações do RCD

Com a definição das classes de agregados reciclados, partiu-se para a verificação da porcentagem de cada fração no RCD. Para tanto, uma amostra de 25 kg foi selecionada após quarteamento e lavagem. O resultado da segregação encontra-se na Figura 13. Já a Figura 14 demonstra as frações após separação.

Figura 13: Separação do RCD em frações.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 14: RCD após segregação



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Agrela et al. (2011) relatam percentagens semelhantes às expostas na Figura 13. De acordo com os autores, porcentagens usuais de um RCD seriam: 80% resíduos de concreto ou rochas naturais; 10-15% de resíduos de cerâmicas ou alvenaria; 3-8% de resíduos asfálticos; 2-6% impurezas em geral.

Com a exclusão dos resíduos descartados o ARM é constituído por 83,94% de ARC e 16,06% ARV.

4.2.2. Determinação da composição e curva granulométrica – NBR NM 248 (2003)

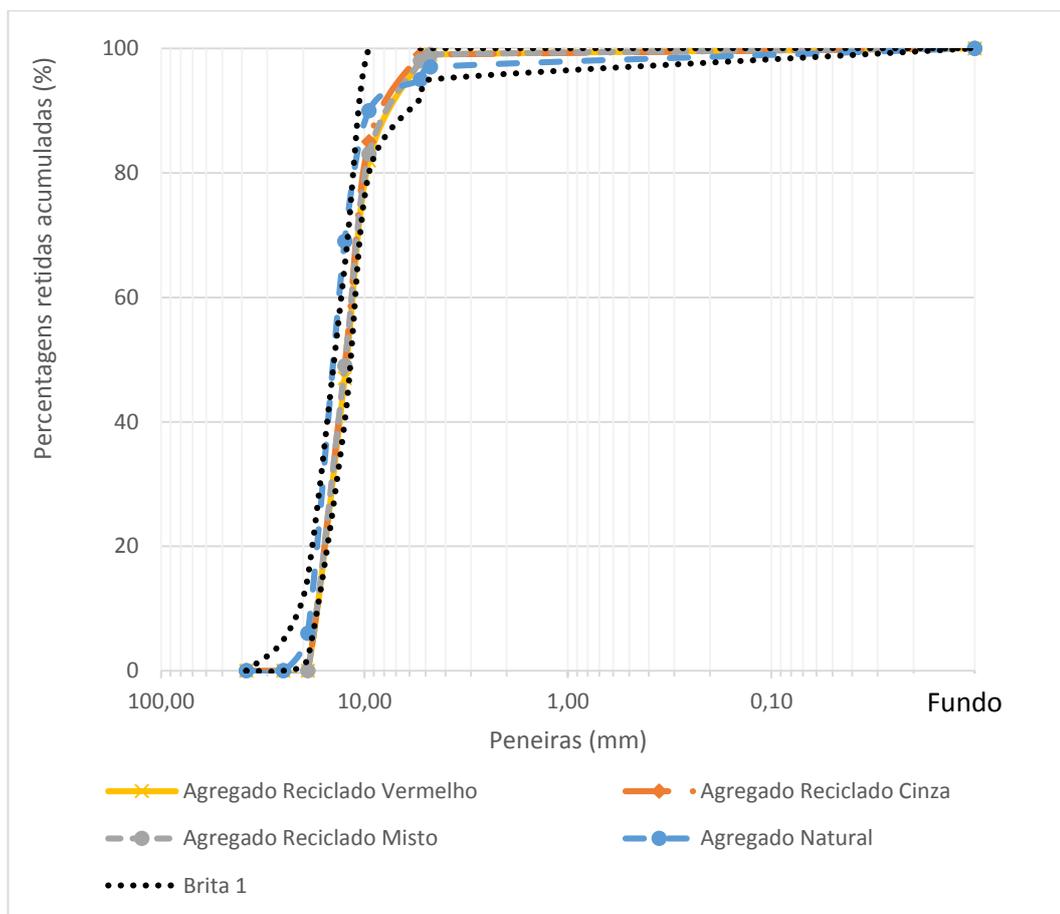
A Tabela 9 demonstra as quantidades retidas acumuladas médias de cada um dos agregados ensaiados. Já a Figura 15 expõe as curvas granulométricas dos agregados graúdos.

Tabela 9: Porcentagens médias acumuladas de agregados retidos nas peneiras da série padrão.

Peneira (mm)	Agregado Natural (%)	Agregado Reciclado Cinza (%)	Agregado Reciclado Misto (%)	Agregado Reciclado Vermelho (%)
38,10	0	0	0	0
25,00	0	0	0	0
19,00	6	0	0	0
12,50	69	49	49	47
9,50	90	85	83	82
5,30	95	99	98	98
4,75	97	99	99	99
Fundo	100	100	100	100

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 15: Percentagens médias acumuladas de agregados retidos nas peneiras da série padrão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O diâmetro máximo característico encontrado é de 19 mm para os três tipos de agregado reciclado, já o do AN tem valor de 25 mm. O valor do módulo de finura foi de 4,57 para o agregado natural, 4,32 para o ARC, 4,29 para o ARM e 4,27 para o ARV.

Pela distribuição granulométrica observa-se que todos os agregados graúdos classificam-se como Brita 1, isso deve ao fato de não haver material retido na peneira de 25 mm (ABNT, 2009a).

4.2.3. Determinação de Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção de Água – NBR NM 53 (2009)

A Tabela 10 apresenta os resultados calculados para os três tipos de agregados, AN, ARC, ARM e ARV.

Tabela 10: Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado na condição saturado superfície seca, massa específica aparente e absorção dos agregados graúdos, valores médios.

	Agregado Natural	Agregado Reciclado Cinza	Agregado Reciclado Misto	Agregado Reciclado Vermelho
d, Massa específica do agregado seco (kg/m³)	2660	2550	2550	2540
d_s, Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (kg/m³)	2640	2290	2220	2100
d_a, Massa específica aparente (kg/m³)	2630	2120	2030	1820
A, Absorção (%)	0,33	7,88	10,88	15,66
P, Porosidade Aparente (%)	0,86	16,71	21,67	28,46

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Percebe-se, de acordo com a Tabela 10, que as massas específicas do agregado natural são sempre maiores que as dos agregados reciclados, sendo a diferença mais acentuada na massa específica aparente, sendo a medida do AN 44,5% maior que a do ARV.

Nagataki *et al.* (2004) relatam menores massa provenientes de agregados reciclados quando comparados aos agregados naturais. Buttha *et al.* (2013) confirmam essa tendência expondo uma diferença de 8,9% entre a massa dos AN e a dos RCD

Com relação à absorção, encontrou-se uma grande diferença entre os três tipos de agregados. O agregado natural apresentou absorção de 0,33% enquanto que o agregado cinza de 7,88%, o misto de 10,25% e o vermelho de 15,66%. É possível relacionar a absorção à porosidade aparente, os resultados indicam que quanto maior a absorção maior a porosidade, novamente há grande diferença entre a porosidade dos RCD e do AN (0,86% para o AN e 28,46% para o ARV, por exemplo), com os agregados reciclados apresentando maiores porosidades.

Assim como no presente estudo, Kou, Poon, e Etxeberria (2011) relatam maiores absorções de água dos RCD em comparação aos AN. Ferreira, Brito e Barra (2011) indicam valores de absorção 4,6% maiores nos RCD em comparação aos agregados naturais.

4.2.4. Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios – NBR NM 45 (2006)

A Tabela 11 expõem os resultados obtidos nos ensaios com os agregados naturais e reciclados.

Tabela 11: Massa unitária do agregado e índice de volume de vazios dos agregados graúdos, valores médios.

	Agregado Natural	Agregado Reciclado Cinza	Agregado Reciclado Misto	Agregado Reciclado Vermelho
ρ_{ap} , Massa unitária do agregado (kg/m ³)	1440,00	1175,79	1115,26	1025,26
E_v , Índice de volume de vazios nos agregados (%)	45,67	53,73	55,97	59,49

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O agregado natural apresenta massa unitária de 23 a 41% maior que os agregados reciclados. Além disso os valores de índice de vazios são maiores nos agregados reciclados, tendo o ARV a menor massa unitária e o maior índice de vazios entre os agregados.

4.2.5. Ensaio de Abrasão “Los Angeles” – NBR NM 51 (2001)

A Tabela 12 demonstra os resultados do ensaio de abrasão Ensaio de Abrasão “Los Angeles”.

Tabela 12: Perda por abrasão dos agregados reciclados e naturais, valores médios.

	Agregado Natural	Agregado Reciclado Cinza	Agregado Reciclado Misto	Agregado Reciclado Vermelho
P, Perda por abrasão (%)	22,00	50,80	49,90	48,40

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados apontam que a perda de material por abrasão é consideravelmente menor nos agregados naturais, os agregados reciclados tiveram desempenho bastante semelhante entre si.

Acredita-se que muito da resistência à abrasão apresentada pelos ARV se deva ao fato de parte de sua constituição ser formada por cerâmicas de piso e revestimento, onde as mesmas são fabricadas com o propósito de apresentarem boa resistência nesse quesito.

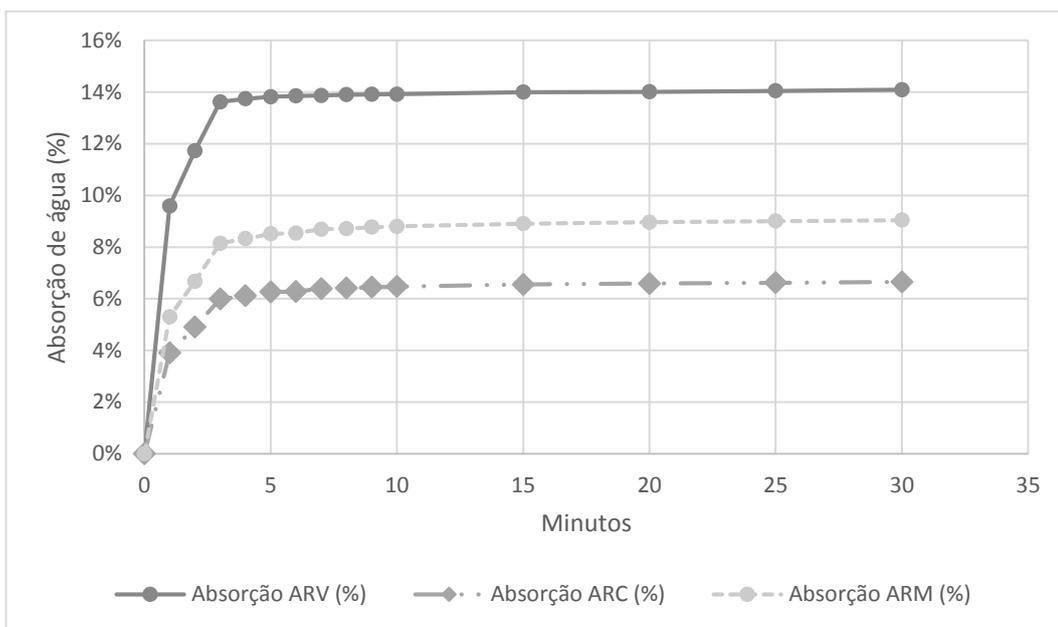
Tem-se, por norma, que o limite para o índice de perda à abrasão é de 50 % de material. Com isso, tem-se os agregados reciclados muito próximos a esse

limite, sendo o ARC reprovado por margem mínima e o ARM e o ARV aprovados por pouco. O AN está dentro dos padrões exigidos (ABNT, 2001).

4.2.6. Curva de Absorção de Água dos Agregados Graúdos

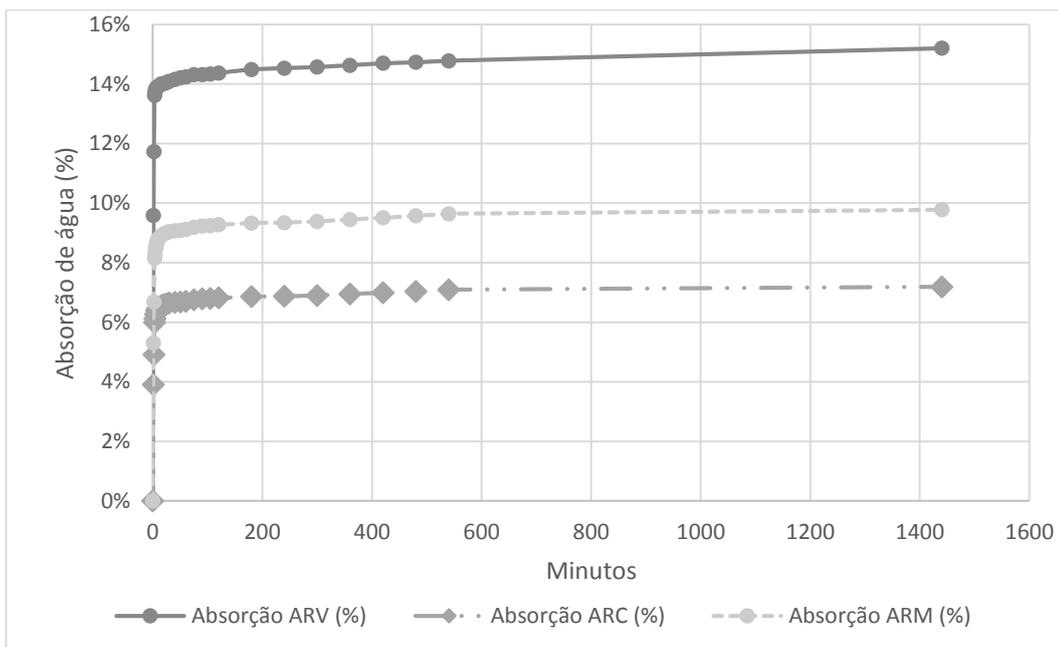
A Figura 16 apresenta as curvas de absorção de água em 30 minutos dos agregados reciclados. Já a Figura 17 expõem as curvas em 24 horas.

Figura 16: Curva de saturação em 30 minutos.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 17: Curva de saturação em 24 horas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Percebe-se que a maior absorção de água (mais de 90% da absorção final) ocorre nos primeiros cinco minutos do ensaio, novamente a absorção dos agregados vermelhos é maior que a dos demais agregados reciclados.

4.2. Caracterização dos Agregados Finos

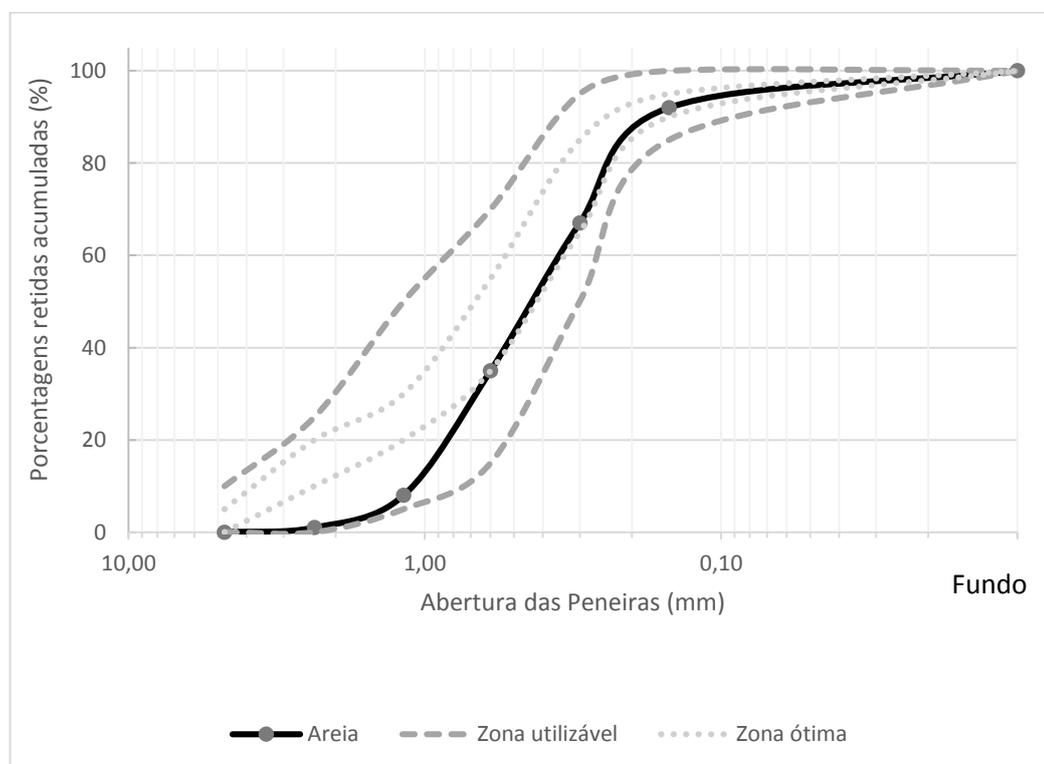
A Tabela 13 demonstra as quantidades retidas acumuladas médias em cada uma das peneiras do ensaio de granulometria. Já Figura 18 expõe a curva granulométrica dos agregados miúdo.

Tabela 13: Porcentagens médias acumuladas de agregado fino retido nas peneiras da série padrão.

Peneira (mm)	Areia retida acumulada (%)
4,75	0
2,36	1
1,18	8
0,60	35
0,30	67
0,15	92
Fundo	100

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 18: Porcentagens médias acumuladas de agregados finos retidos nas peneiras da série padrão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O módulo de finura do agregado fino foi considerado dentro da zona utilizável, com o valor de 3,04 (ABNT, 2009a).

A distribuição granulométrica demonstra que, de acordo com a NBR 7211 (2009), os limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo em questão se encontram majoritariamente dentro da zona utilizável e em algumas peneiras na zona ótima (ABNT, 2009a).

A massa específica do agregado miúdo foi calculada pelo método do Frasco de Chapman, como demonstrado na (ABNT, 1987). O valor encontrado foi de 2,58 g/cm³.

De acordo com os preceitos da NRB NM 45, calculou-se os valores da massa unitária do agregado miúdo – 1393,68 kg/m³ – e o índice de vazios do material – 45,81%.

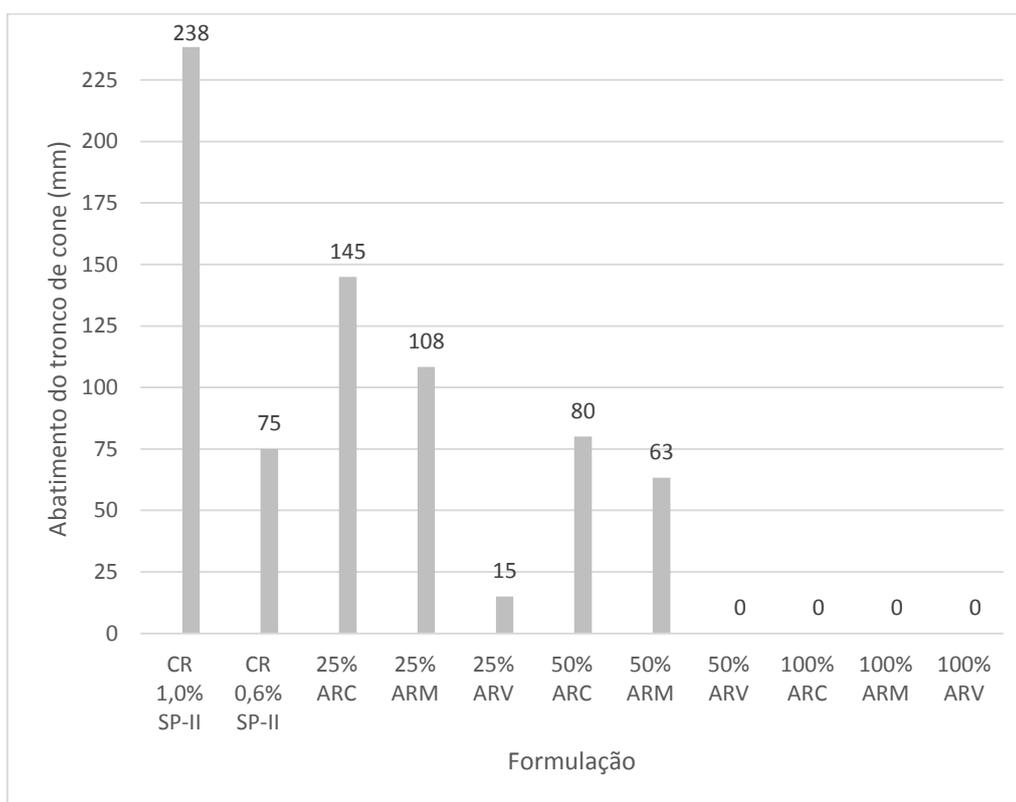
4.3. Caracterização dos Concretos Fabricados

A caracterização do concreto ocorreu por meio de ensaios com os corpos de prova. Os resultados, apresentados nas seções subsequentes, são médias obtidas a partir dos dados expostos no Apêndice

4.3.1. Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone

Os resultados do *Slump Test*, apresentados na Figura 19, indicam a trabalhabilidade dos concretos fabricados. Todos os concretos com presença de agregados de RCD utilizaram em sua formulação 1,0% de SP-II R, o máximo recomendado pela fabricante do aditivo. No caso do concreto referência, o uso de 1,0% de SP-II R, resultou em uma trabalhabilidade de 238 mm, tendo em vista que o concreto visado é o usualmente utilizado em estruturas convencionais, considerou-se esse valor desnecessariamente alto. Com isso, optou-se pela fabricação de um concreto referência com 0,6% de SP-II R, essa formulação foi adotada para todos outros ensaios.

Figura 19: Abatimento médio do tronco de cone.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Pode-se perceber que a trabalhabilidade do concreto está ligada ao teor de agregado reciclado presente na mistura. Quanto maior a quantidade de RCD, independentemente do tipo de resíduo, menor o abatimento do tronco de cone. Esses resultados são corroborados por Limbachiya (2004), Matias et al. (2014), Zhang e Zong (2014), dentre outros, que também indicam perda de trabalhabilidade com uso de RCD.

A perda de trabalhabilidade está ligada à maior absorção por parte dos agregados reciclados, esses absorvem água da mistura. Com a utilização de 1% de SP-II R o concreto de referência apresenta, em média, 238 mm de abatimento, enquanto os concretos com 50% ARV, 100% ARC, 100% ARM e 100% ARV apresentam 0 mm de abatimento.

Observa-se, também, que quanto maior a absorção de determinado tipo de agregado, maior é a influência negativa deste sobre a trabalhabilidade. Analisando-se as substituições de 25 e 50% entende-se que o ARC é o menos prejudicial à trabalhabilidade sendo seguido pelo ARM, o ARV (agregado reciclado mais absorvente) é o que mais influencia negativamente na absorção do concreto.

Os resultados assinalam que substituições totais do AN por ARCD produzem concretos com abatimento do tronco de cone igual a 0 mm. De maneira

geral, a utilização do ARV também leva a concretos sem trabalhabilidade. Esses fatos apontam para a necessidade de pré-molhagem desses resíduos no caso de concretos com 100% de agregados reciclados ou no caso do uso de agregados reciclados vermelhos.

Dentre os concretos com resultado do *Slump Test* iguais a zero, um se mostrou especialmente difícil com relação à moldagem e adensamento dos corpos de prova, o 100% ARV. A Figura 20 expõe o CP resultante da moldagem em questão.

Figura 20: CP 100%ARV



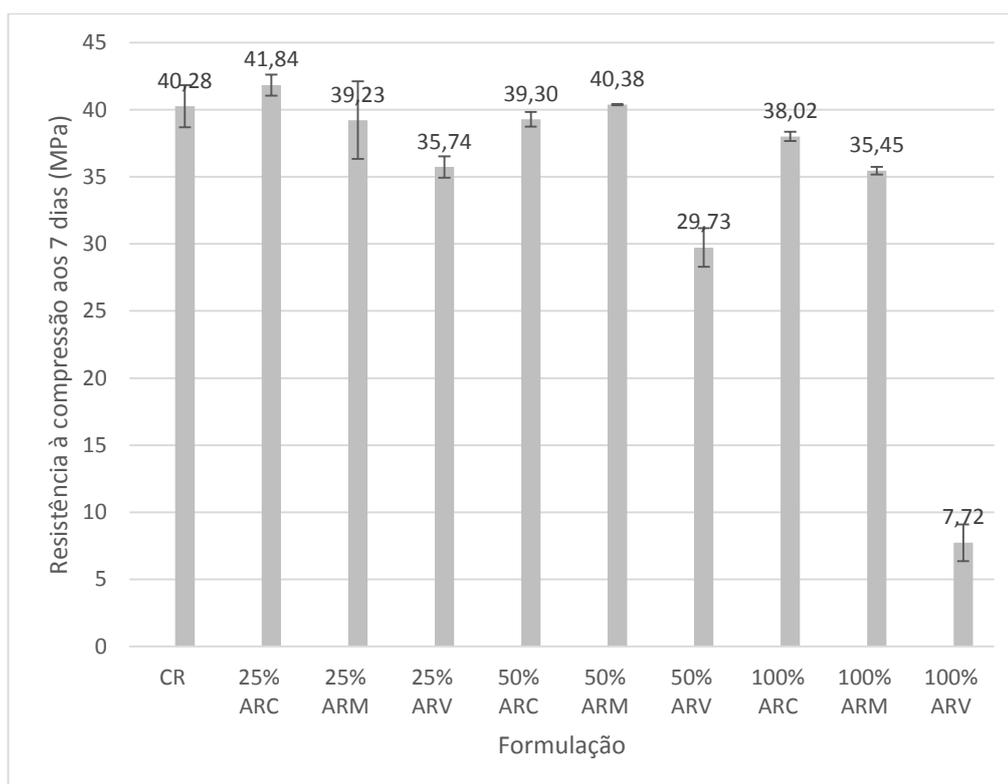
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Entende-se que, nas condições desse estudo, os concretos reciclados, com 25 e 50% de ARC e ARM, apresentam trabalhabilidade mínima para que possam ser utilizados em estruturas convencionais. Outras possibilidades de aditivos e alterações no traço podem fazer com que outros teores e tipos de substituição do AN por RCD se viabilizem.

4.3.2. Resistência à Compressão aos 7 e 28 dias.

As médias obtidas, a partir de valores alcançados nos ensaios de 3 CP por traço, em ensaios de compressão axial, aos 7 e 28 dias estão apresentadas na Figura 21 e Figura 22, respectivamente.

Figura 21: Resistência média à compressão aos 7 dias.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Aos 7 dias, quatro traços apresentaram desempenho semelhante – considerando o desvio padrão – ao concreto de referência com 100% AN, são elas: 25% ARC, 25% ARM, 50% ARC e 50% ARM. Destas quatro, duas apresentam valores médios ligeiramente superiores ao concreto de referência (40,28 MPa), o ARM 25% (41,84 MPa) e o ARM 50% (40,38 MPa).

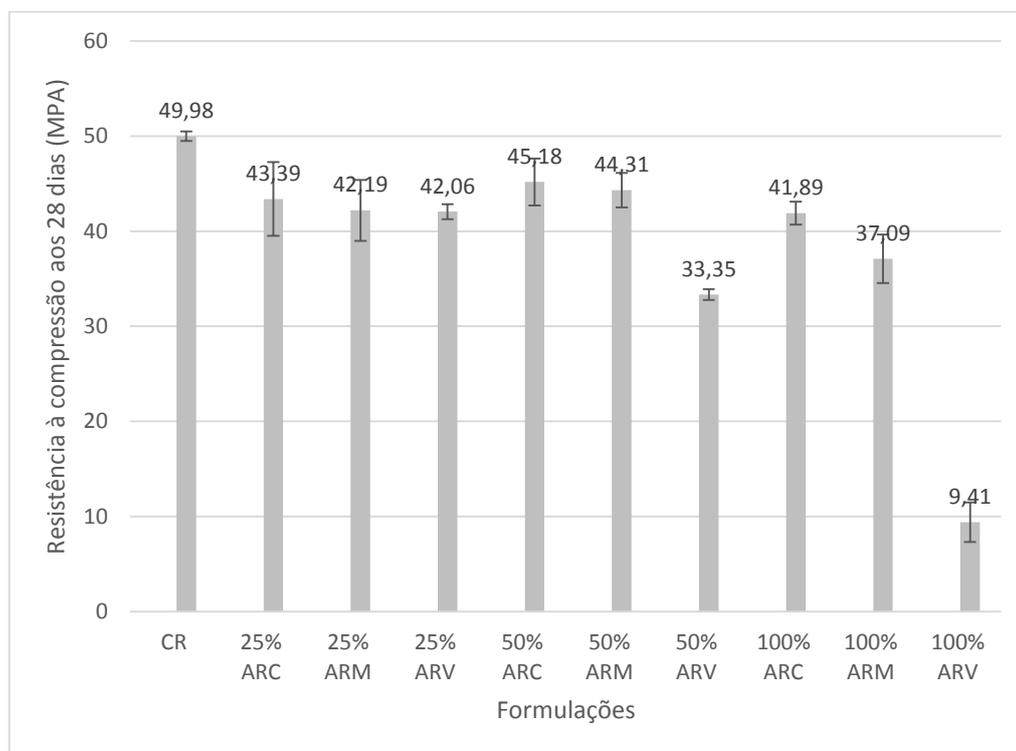
Os resultados aos sete dias demonstram que os concretos com adição de ARV e os com 100% de agregados reciclados têm considerável perda de resistência, principalmente com 50 e 100% ARV. Os traços com 100% de ARC e ARM apresentam perdas de 5 e 11%, respectivamente, em relação à referência enquanto o com 100% ARV apresenta perda de resistência de mais de 80% em relação ao CR.

Ao se analisar as formulações de acordo com o tipo de RCD percebe-se que os ARC e ARM obtiveram resultados superiores aos ARV. Entende-se que isso se deva a maior fragilidade do material cerâmico frente aos cimentícios e aos naturais.

A moldagens dos concretos ocorreram sem que houvesse pré-saturação dos agregados, com isso o fator A/C efetivo das misturas com presença de RCD foi menor. Infere-se que esse fato, até determinado ponto, manteve o desempenho

de alguns tipos de concreto (com ARC e ARM) similar ao concreto apenas com agregado natural. A situação aos 28 dias (Figura 22), já se demonstra diferente.

Figura 22: Resistência média à compressão aos 28 dias.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados aos 28 dias apontam um despenho inferior dos concretos com agregados reciclados em comparação ao concreto referência. Com o uso do RCD tem-se uma perda mínima de aproximadamente 10% (50% ARC), na resistência à compressão, e uma perda máxima de aproximadamente 81% (100% ARV).

Têm-se concretos com 25% de RCD, 50% ARC e ARM e 100% ARC com perdas em torno dos 15% na resistência à compressão. Sendo assim, infere-se que ajustes e adequações no traço dessas substituições seriam suficientes para correção dessa perda de resistência.

Essa tendência é corroborada por diversos estudos, onde adição de RCD prejudica o desempenho do concreto. Etxeberria, Vázquez e Barra (2007), mantendo constante a relação A/C e utilizando ARC, relatam perdas de resistência de 20 a 25% com substituições de 25, 50 e 100% do AN.

Utilizando substituições totais de AN por ARM, Richardson, Coventry e Graham (2009), relatam elevadas perdas na resistência à compressão, essas

podem chegar a até 53%, isso se deveria à fragilidade do novo agregado quando comparado ao AN.

Utilizando teores de substituição de 20, 50 e 100% Kou e Poon (2012a) relatam perdas de resistência a compressão. Os concretos, fabricados com mesma quantidade de água e cimento, tem perda de resistência proporcional ao teor de substituição.

Infere-se que, até determinado ponto, a diminuição do fator A/C seja benéfica aos concretos reciclados, aumentando sua resistência à compressão e compensando a fragilidade dos RCD. A partir de determinado fator de substituição (50% ARV, 100% ARM) tem-se que as características negativas dos RCD (baixa resistência, alta porosidade, baixa densidade etc.) sobrepõem-se à diminuição do fator A/C.

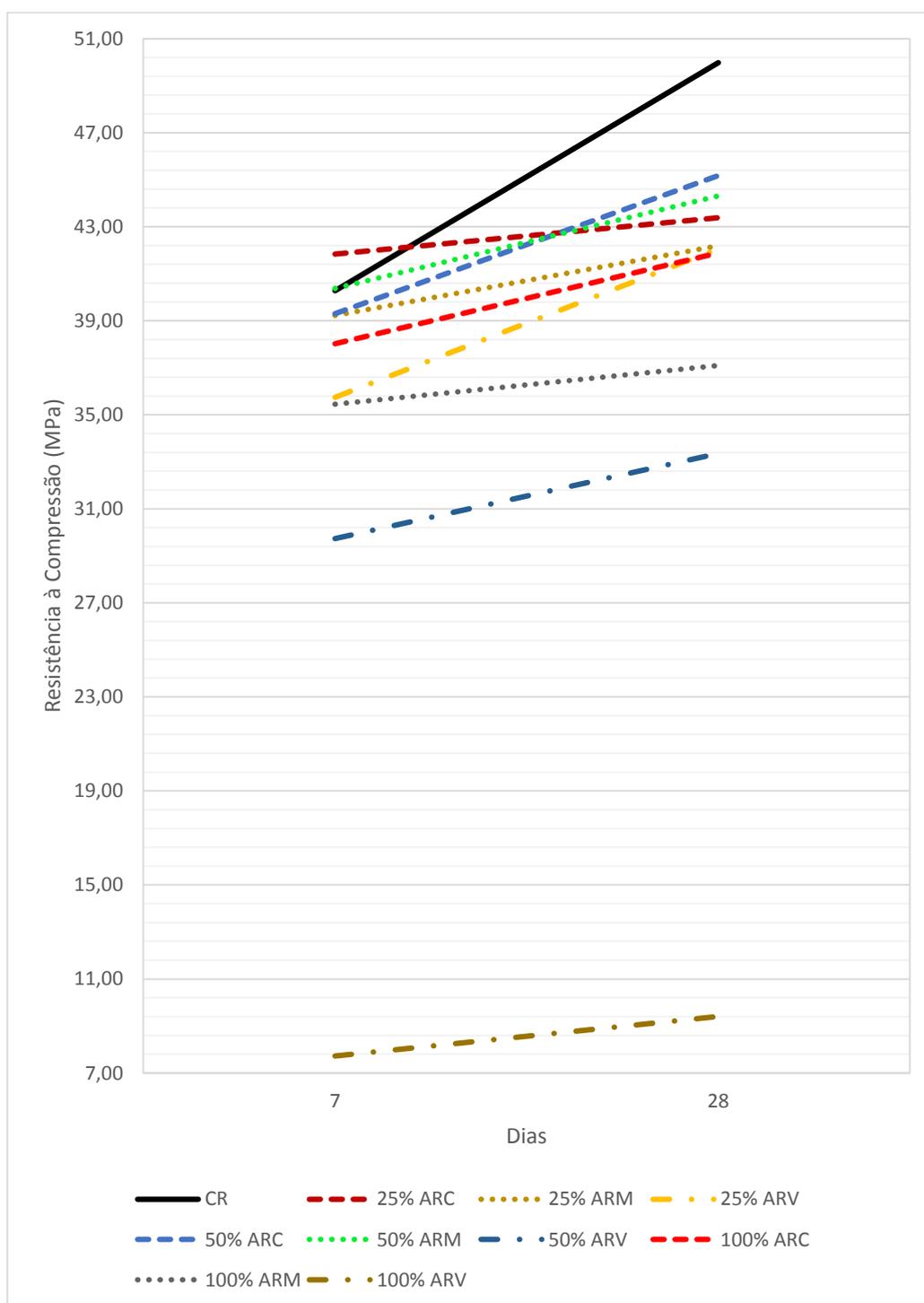
De acordo com a Figura 22, os concretos com piores desempenhos são aqueles que utilizam ARV (50 e 100%), e os melhores, dentre os reciclados, são aqueles com adição de ARC. Percebe-se que a alta absorção, baixa densidade e alto índice de vazios dos ARV (e em menor grau dos ARC e ARM) contribuem para a perda de resistência. Mesmo o ARC e o ARM, quando utilizados em substituição de 100%, são consideravelmente prejudiciais.

Zhang e Zong (2013) utilizam agregados reciclados cerâmicos em seu estudo, onde os resultados apontam para quedas de resistência proporcionais aos níveis de substituição dos AN. Já Gomes e Brito (2009), trabalhando com ARC, indicam que são pouco significativas as consequências da inserção de agregado reciclado de concreto na mistura, o que corrobora os resultados expostos na Figura 21 e as perdas de cerca de 10% expostas na Figura 22.

Dentre os concretos reciclados apresentados, entende-se que os com 25% de RCD, com 50% de ARC e ARM e 100% ARC podem ser utilizados sem grandes perdas (entre 10 e 20%) no que diz respeito à resistência à compressão em comparação com o concreto referência.

A Figura 23 demonstra o ganho de resistência à compressão nos concretos dos 7 para os 28 dias.

Figura 23: Ganho de resistência à compressão dos 7 para os 28 dias.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

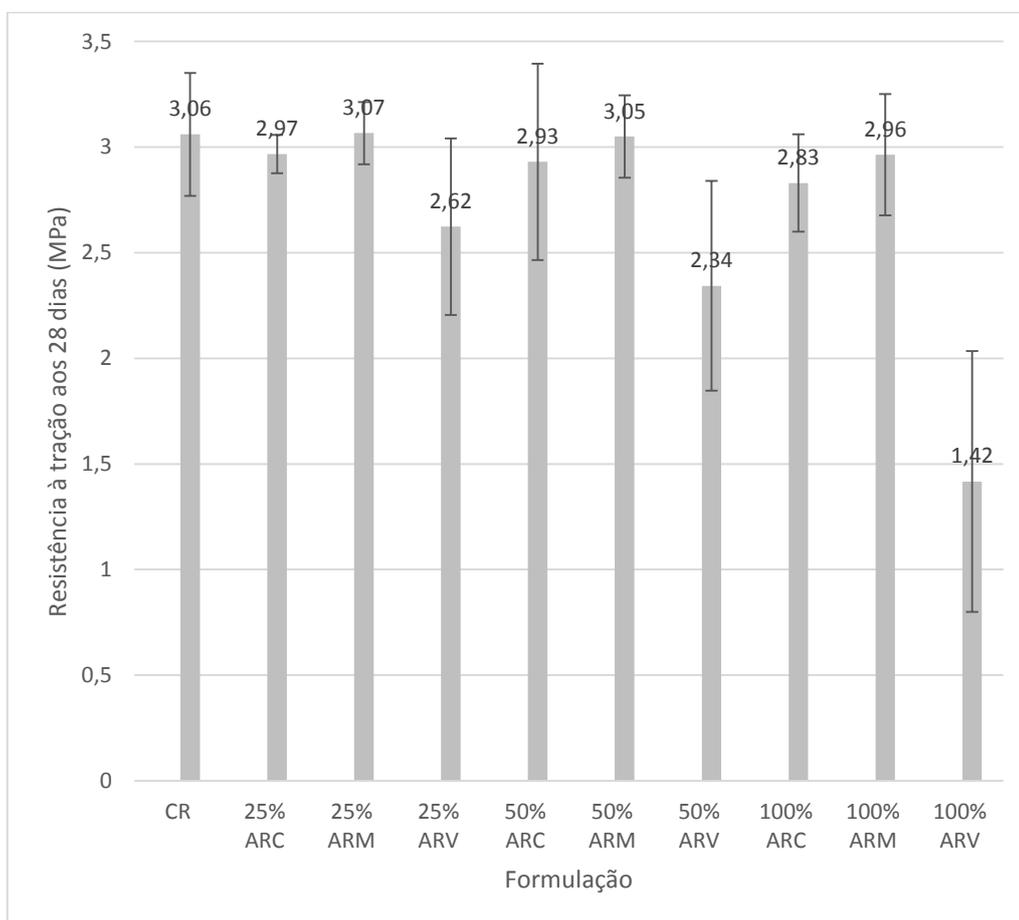
O que percebe-se na Figura 23 é uma maior taxa de ganho de resistência à compressão (dos 7 para os 28 dias) do concreto constituído apenas de agregados naturais, sendo esse ganho representado pela inclinação das retas do gráfico. Kou, Poon e Etxeberria (2011) relatam inversão dessa tendência em ensaios com 1 e 5 anos e que a longo prazo os concretos com RCD têm um maior

ganho de resistência à compressão. Aos 28 dias os concretos com RCD apresentam diminuição de resistência à compressão de 21,7 e 18,8% em relação ao CR, aos cinco anos essa diferença cai para 6,3 e 8,9%. Os autores indicam que a presença do ARC melhorou a microestrutura da ZTI e aumentou a força de ligação entre a nova pasta de cimento e os agregados antigos após hidratação contínua.

4.3.3. Resistência à Tração aos 28 dias

A Figura 24 apresenta os resultados médios obtidos para resistência à tração por compressão diametral dos concretos fabricados. A obtenção desses valores se deu pela execução de ensaios de compressão diametral.

Figura 24: Resistência média à tração aos 28 dias.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados indicam que o acréscimo de agregados reciclados cinzas e mistos aos concretos não compromete as resistências à tração. Levando-se em conta o desvio padrão, todas as misturas, exceto as com presença de 100% ARV, apresentam valores próximos – inclusive, o valor médio de resistência à tração do concreto 25% ARM, é maior que o do CR. Novamente a adição de resíduos

cerâmicos (ARV) prejudica o desempenho dos concretos, diminuindo a resistência à tração, principalmente quando ocorre a substituição total.

Com relação aos teores de substituição do AN por determinado tipo de RCD, entende-se que substituições por ARC e ARM não prejudicam o desempenho dos concretos fabricados, uma vez que os valores obtidos, para todos os teores, são semelhantes levando-se em conta o desvio padrão.

Em estudo que utiliza ARC, há a corroboração dos dados expostos na Figura 24. Os autores expõem resultados de concretos com agregados reciclados que atingem resistências à tração iguais ou maiores do que o concreto fabricado com agregados naturais. De acordo com os pesquisadores, o concreto reciclado tem sua microestrutura melhorada pelo uso de RCD, principalmente na ZTI (KOU; POON; ETXEBERRIA, 2011).

Ettxeberria, Vázquez e Barra (2007) também relatam aprimoramento do desempenho de concretos com adição de ARC. Os autores apontam como motivo a efetividade da nova ZTI do concreto reciclado.

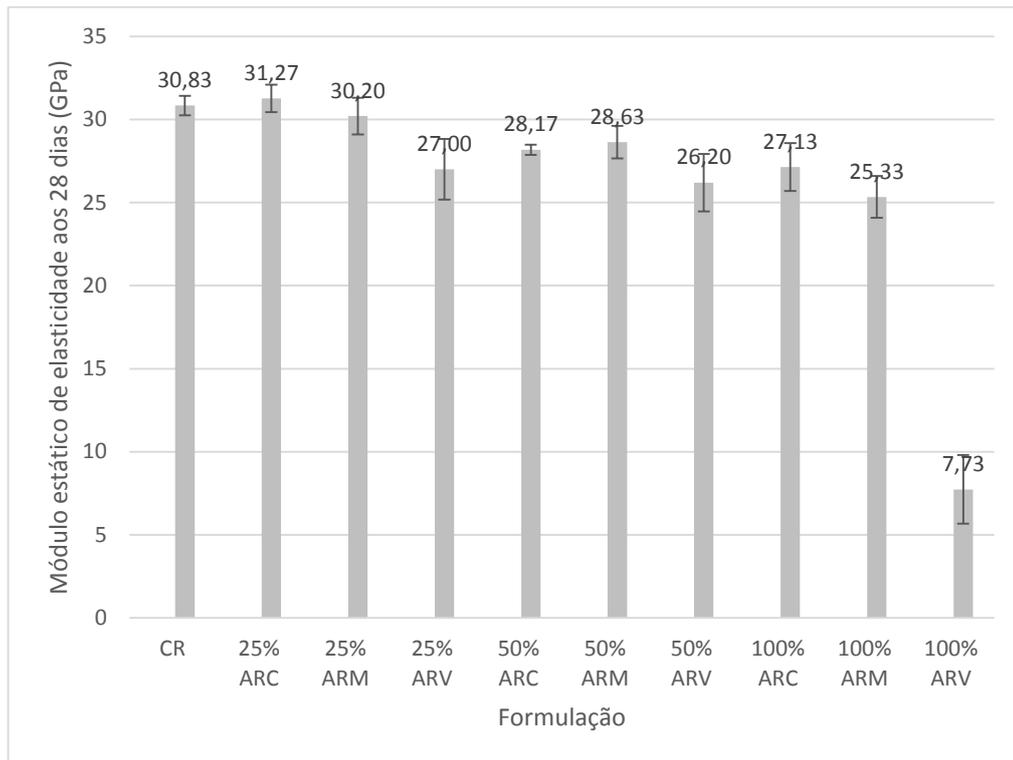
Entende –se que, diferentemente da resistência à compressão, onde a resistência do agregado tem contribuição efetiva na resistência do concreto, a resistência a tração está mais ligada à microestrutura do concreto e da relação entre os agregados e a pasta. Sendo assim o uso de ARCD não se mostra deletério.

Tendo em vista a resistência à tração, avaliada por meio de ensaio de compressão diametral, conclui-se que os concretos com presença ARC e ARM, independente do grau de substituição, e ARV (25 e 50%) apresentam desempenho similar ao concreto referência.

4.3.4. Módulo Estático de Elasticidade aos 28 dias

Os resultados do módulo estático de elasticidade médio, obtidos aos 28 dias, são expostos na Figura 25

Figura 25: Módulo estático de elasticidade médio aos 28 dias.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A análise dos dados indica que o teor de adição de resíduos e o tipo de RCD influenciam nos valores obtidos nos ensaios. Inicialmente é importante notar que apenas duas formulações com RCD atingiram valores similares ao concreto referência, levando-se em conta o desvio padrão, o 25% ARC e o 25% ARM, tendo o primeiro um valor médio pouco superior à referência. As demais formulações, obtiveram valores inferiores no módulo de elasticidade.

Ao avaliar-se a influência do teor de substituição (levando-se em conta determinado tipo de resíduo) percebe-se que: quanto maior a quantidade de RCD na mistura, menor são os valores médios de módulo de elasticidade obtidos. Analisando-se o tipo de agregado utilizado nota-se que o agregado cinza tem um desempenho superior dentre os RCD, ele é seguido pelo ARM e por último o ARV (exceto na substituição de 50% onde o valor médio para o ARM é ligeiramente maior).

Apesar das considerações acerca das quedas nos valores do módulo de elasticidade, nota-se que na maioria dos traços (seis deles) as perdas apresentadas são de no máximo 20% com relação ao concreto referência. Isso indica que o uso de RCD não afeta massivamente o módulo de elasticidade.

Infere-se que essas reduções de até 20% no módulo de elasticidade podem ser reduzidas com correções nos traços, com o intuito de melhorar a ZTI.

Percebe-se que o comportamento dos traços com relação ao módulo de elasticidade é similar ao apresentado na resistência à compressão, as percentagens de perda de resistência são de mesma grandeza, em torno dos 20%.

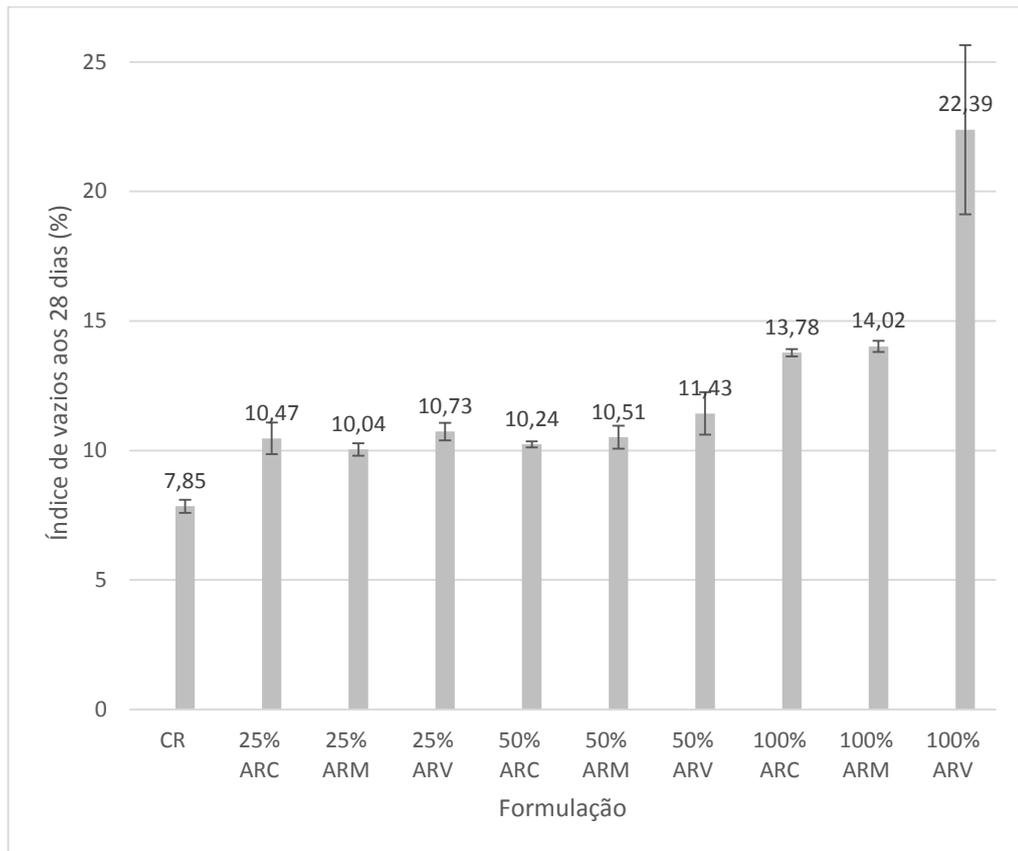
Limbachiya (2004) indica que o módulo de elasticidade de concretos fabricados com ARM graúdos é pouco afetado pela adição dos resíduos, principalmente os concretos com teores de até 30% de substituição do AN. Outro estudo relata diminuição do módulo de elasticidade entre 14 e 28% – valores próximos aos encontrados na presente pesquisa – segundo o pesquisador, esse fato ocorre devido à variação de módulo de elasticidade entre os agregados (HANSEN T. C., 1985).

De maneira geral é possível considerar que substituições do AN por 25% de ARC e/ou ARM apresentam desempenho similar à de concretos estruturais moldados com apenas agregados convencionais.

4.3.5. Absorção e Índice de Vazios do Concreto aos 28 dias

A Figura 26 expõem os resultados do índice de vazios do concreto aos 28 dias. Nota-se que este tem relação direta com os valores de índice de vazios dos agregados, vide Tabela 11: Massa unitária do agregado e índice de volume de vazios dos agregados graúdos, valores médios. Os agregados apresentam índices de vazios de 45,67; 53,63; 55,97 59,49% para os agregados naturais, cinzas, mistos e vermelhos, respectivamente.

Figura 26: Índice de vazios médio do concreto aos 28 dias.



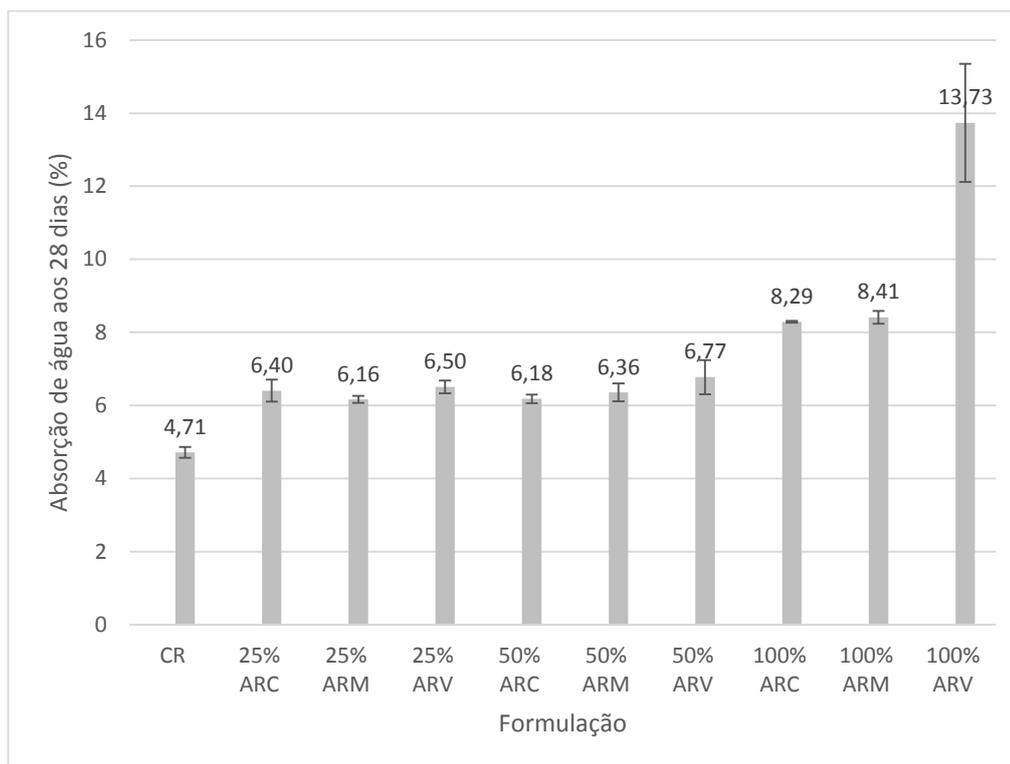
Fonte: Elaborado pelo Autor.

O concreto fabricado com apenas agregados naturais, que possuem menores valores de índice de vazios de agregados, é aquele que também possui menor índice de vazios do concreto. Os agregados vermelhos, por sua vez, apresentam maior índice de vazios, tanto dos agregados quanto dos concretos – sendo que esse fato ocorre para todos graus de substituição dos AN.

Percebe-se pouca variação de resultados entre os concretos com 25 e 50% de substituição do agregado natural, sendo os mesmos muito próximos quando leva-se em conta o desvio padrão.

A Figura 27 explicita os resultados alcançados no quesito absorção de água do concreto aos 28 dias.

Figura 27: Absorção de água média aos 28 dias.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tem-se que a introdução e aumento no fator de substituição dos agregados naturais causam, de forma geral, um aumento na absorção de água das formulações. Essa tendência também pode ser relacionada aos dados expostos na Tabela 10, quanto menor a absorção média do agregado menor a absorção média do concreto fabricado com o mesmo. Única exceção se dá no caso do concreto com 25% ARM, que obteve valor de absorção médio ligeiramente menor que o concreto com 25% ARC.

Gomez-Sorberón (2002), corrobora os resultados encontrados, indicando que a absorção de água nos concretos é majorada com o uso de RCD substituindo o AN. Dentre os traços estudados por Corinaldesi e Moriconi (2009), a que apresenta maior absorção de água é a com 100% de agregados reciclados sem presença de sílica-ativa. Segundo os autores essa diferença entre concretos convencionais e com RCD se daria devido à alta absorção de água dos agregados reciclados.

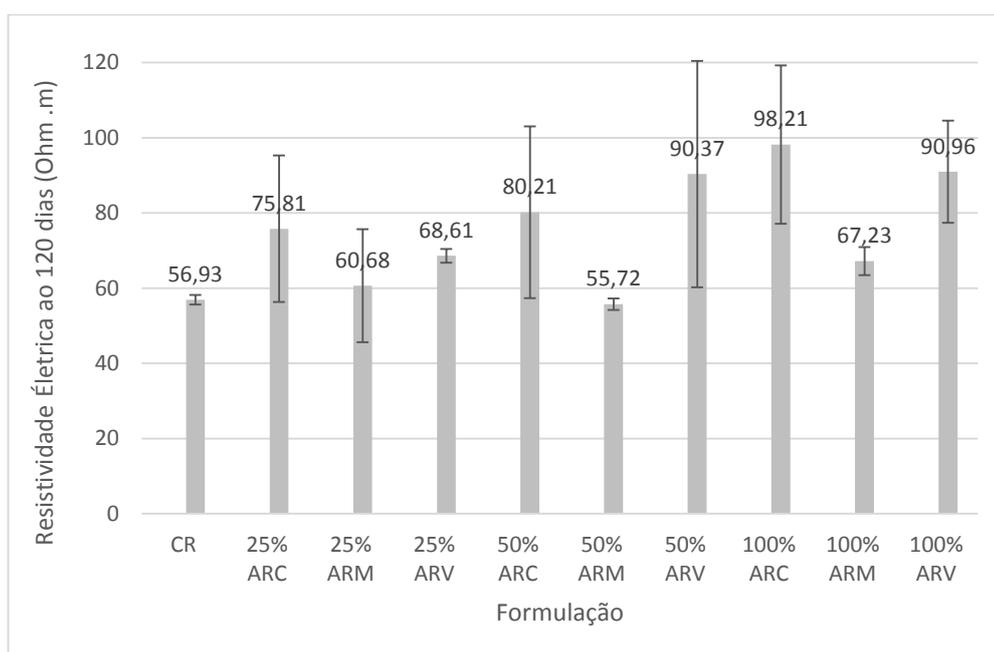
Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2000) encontraram resultados similares aos expostos na Figura 27. Os mesmos relatam absorção de água de 5% em concretos convencionais e absorção de água mínima de 7% em concretos utilizando RCD.

Tanto no quesito índice de vazio quanto na absorção de água não há concreto similar à referência, fabricada apenas com brita gnaisse. Infere-se que isso se deve às diferenças apresentadas pelos RCD em comparação aos AN, os mesmos apresentam maior absorção de água e índice de vazios, características que são levadas para os concretos reciclados.

4.3.6. Resistividade elétrica do concreto.

A Figura 28 apresenta os resultados obtidos para a resistividade elétrica média dos CP de cada uma das formulações aos 120 dias.

Figura 28: Resistividade elétrica média aos 120 dias.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados indicam uma grande variabilidade entre as formulações e, em alguns casos, um desvio padrão elevado. Não é possível perceber tendência de aumento ou diminuição de resistividade elétrica com a variação do teor de substituição do AN por RCD. Também não é possível afirmar qual tipo de RCD teve melhor desempenho.

Contudo, entende-se que não houve perda de resistividade elétrica com o uso de RCD como agregados graúdos. Isso pode ser atribuído à diminuição do fator A/C efetivo da mistura, uma vez que os RCD absorvem parte da água de amassamento, essa diminuição tende a melhorar zona de transição interfacial entre RCD e pasta.

Apesar da variabilidade dos resultados, todas as formulações foram classificadas na mesma faixa de risco de corrosão da armadura de aço. Os

concretos moldados foram classificados tendo baixa resistência à corrosão das armaduras. A Tabela 14 indica as faixas de probabilidade de corrosão da armadura (BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2011; HOPPE, 2005).

Tabela 14: Resistividade elétrica do concreto X Probabilidade de corrosão da armadura

Resistividade elétrica do concreto	Resistência à corrosão da armadura
> 200 Ohm.m	Muito Alta
100 a 200 Ohm.m	Alta
50 a 100 Ohm.m	Baixa
<50 Ohm.m	Muito Baixa

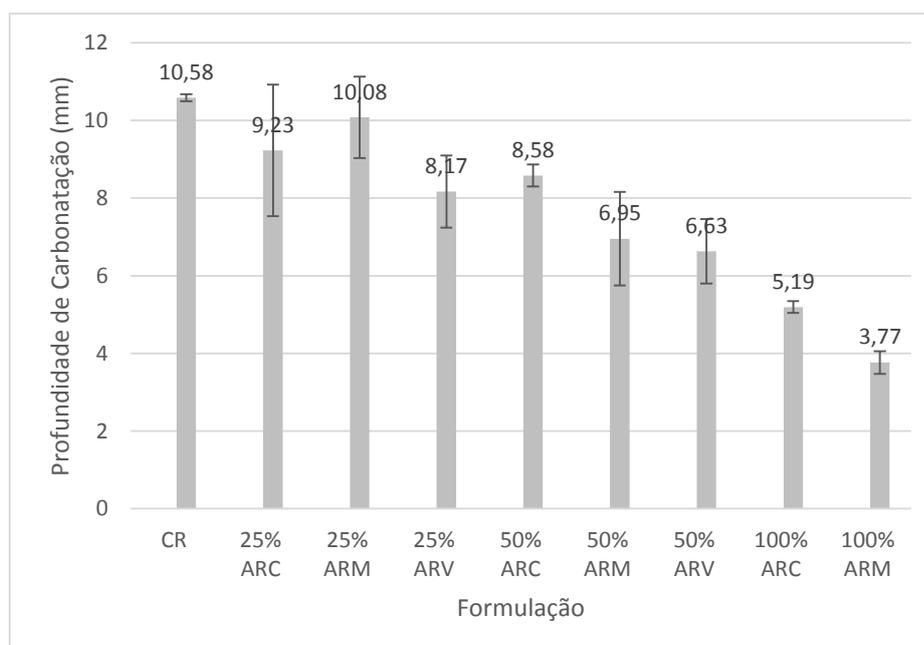
Fonte: Adaptado de Baroghel-Bouny *et al.* (2011).

Baroghel-Bouny *et al.* (2011) indicam que concretos fabricados com 20 e 25% de resíduos cerâmicos obtiveram classificação de baixa resistência à corrosão das armaduras (mesma classificação de todos os concretos da presente pesquisa) enquanto o concreto referência obteve classificação de muito baixa resistência. De acordo com os autores, a não condutividade inata das cerâmicas sobrepujou o fato das mesmas serem mais porosas que os agregados naturais, conferindo dessa forma uma maior resistividade.

4.3.7. Avanço da frente de carbonatação aos 45 e 90 dias.

A Figura 29 apresenta a profundidade do avanço da frente de carbonatação aos 45 dias.

Figura 29: Profundidade média da frente de carbonatação aos 45 dias de exposição.



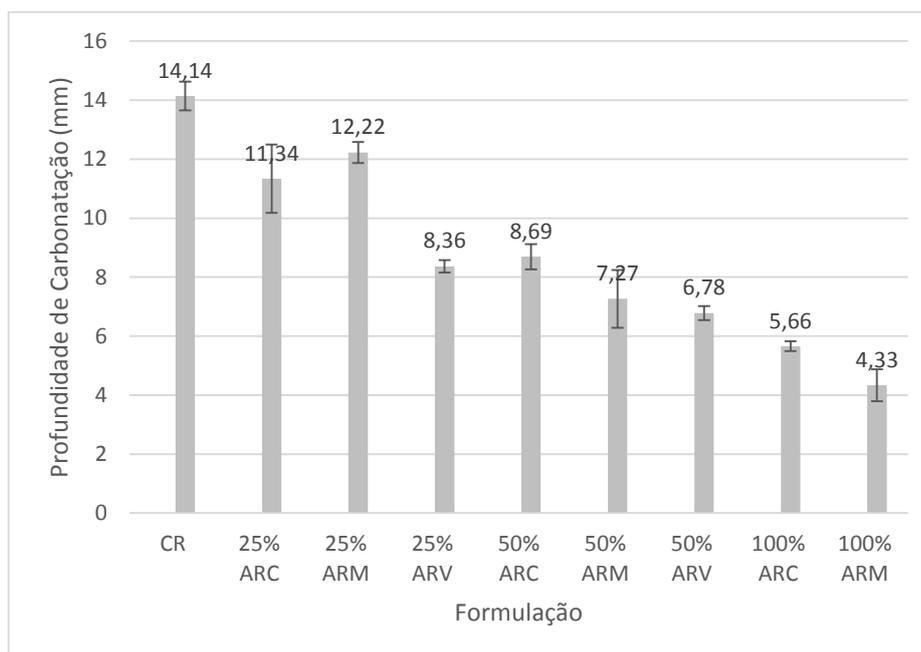
Fonte: Elaborado pelo Autor.

De maneira geral os dados demonstram que a adição de resíduos de construção e demolição melhora a resistências ao avanço da frente de carbonatação nos concretos fabricados, independentemente do tipo de RCD utilizado, e em grau proporcional a quantidade de agregado natural substituído por agregado reciclado.

Tem-se o concreto referência com a maior profundidade de carbonatação (10,58 mm), esse é seguido pelos concretos com 25, 50% de substituição e finalmente, os com menores profundidades de carbonatação, os concretos fabricados com 100% RCD (5,19 para o ARC e 3,77 para o ARM) – a profundidade de carbonatação é inversamente proporcional ao teor de substituição. Analisando-se a carbonatação com relação ao tipo de resíduo utilizado, comprova-se o melhor desempenho do ARV com relação ao ARC e ao ARM (para substituições de 25 e 50%).

A tendência apresentada aos 45 dias se mantém aos 90 dias, como demonstra a Figura 30.

Figura 30: Profundidade média da frente de carbonatação aos 90 dias de exposição.



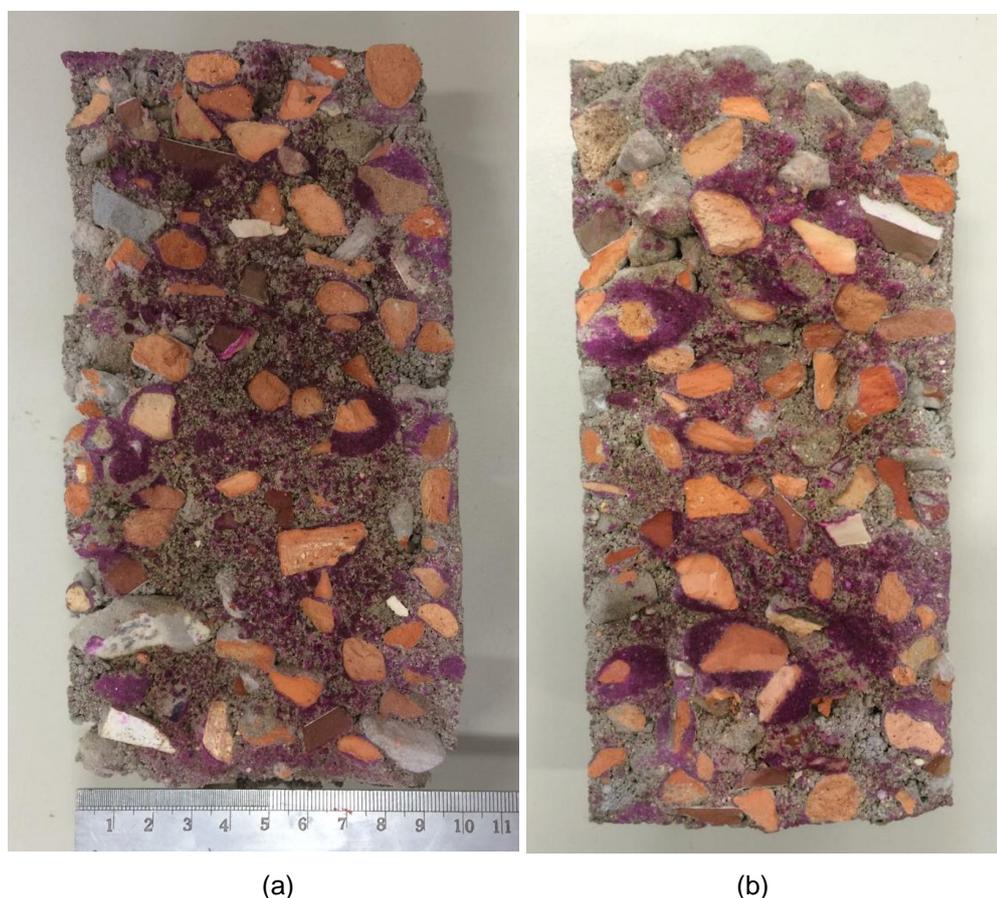
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Novamente tem-se o concreto com 100% agregado natural com a maior profundidade de carbonatação, essa se apresenta 326% maior que a profundidade de carbonatação do concreto com 100% ARM, o traço com menor avanço da frente. O desempenho do ARV (para substituições de 25 e 50%) é

superior aos dos outros agregados reciclados e o teor de substituição do AN é inversamente proporcional a profundidade de carbonatação.

Nas Figuras 34 e 35, nota-se a ausência de dados da formulação com 100% ARV. Como exposto na seção 4.3.1. Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone a formulação com 100% de agregado vermelho mostrou-se de muito difícil adensamento, o que resultou em um concreto muito poroso. Com isso os ensaios de carbonatação acelerada desse concreto resultaram na carbonatação total dos CP. Optou-se pelo não lançamento dos dados nos gráficos por uma questão de escala (uma vez que a profundidade de carbonatação desses CP pode ser considerada como 100 mm). A Figura 31 expõem a carbonatação nos CP dessa formulação aos 45 dias (a) e aos 90 dias (b).

Figura 31: Carbonatação total dos CP da formulação 100% ARV aos 45 (a) e 90 dias (b).



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com base nos dados apresentados infere-se que o avanço da frente de carbonatação está fortemente ligado ao fator A/C efetivo da formulação e que a adição de agregados reciclados é benéfica nesse quesito. Os RCD apresentam absorção de água muito elevada em relação aos AN (vide Tabela 10) sendo assim, no momento da moldagem, absorvem água de amassamento da mistura, com isso

o fator A/C dos concretos reciclados é menor. Quanto maior o teor de substituição e quanto mais absorvente o RCD (ARV) menor o fator A/C efetivo e, de acordo com os resultados da carbonatação acelerada, menor o avanço da frente de carbonatação.

Resultados similares aos apresentados são expostos por Thomas et al. (2012) que apontam que no caso onde mantem-se a resistência à compressão constante, os concretos com RCD levam pequena vantagem sobre os concretos de referência no quesito resistência ao avanço da frente de carbonatação. Isso pode ser explicado pelo fator A/C dos concretos com RCD ser menor, em tais circunstâncias. Corinaldesi e Moriconi (2009) apontam que, com relação à carbonatação, os resultados do ensaio foram fortemente dominados pela relação A/C. O traço com menor quantidade de água e 100% de RCD apresentou melhores resultados com relação à carbonatação.

Levy e Helene (2004) apontam que o desempenho superior dos concretos reciclados pode se dever aos álcalis extras na mistura. Esses álcalis seriam advindos de cimento extra e da argamassa contida nos RCD que contém partículas de hidróxido de cálcio que interferem na alcalinidade.

De maneira geral entende-se que a diminuição do fator A/C, pela absorção de água dos agregados reciclados, permite que os concretos reciclados tenham melhores resultados no quesito resistência ao avanço da frente de carbonatação, como exposto nos resultados apresentados.

5. Conclusões

É possível concluir que os principais objetivos propostos pela presente pesquisa foram alcançados. A caracterização dos agregados naturais e dos três tipos de resíduos evidenciam as diferenças entre os RCD e os AN, sendo o agregado reciclado de com características mais adequadas para fabricação de concretos estruturais o ARC seguido pelos ARM e ARV. Os RCD apresentam menores massas, maiores absorções de água, maiores volumes de vazios e menores resistências à abrasão, em relação aos agregados naturais.

Foi possível substituir o agregado graúdo natural dos concretos por resíduos de construção e demolição. Constatou-se que essas substituições têm influência, negativa ou positiva, no desempenho dos concretos, dentre os principais efeitos do uso de RCD como agregado graúdo em concretos estruturais pode-se citar:

- A trabalhabilidade de todos os traços foi afetada pela adição de resíduos. Quanto maior a quantidade de RCD e quanto mais absorventes esses resíduos, menor a trabalhabilidade dos concretos fabricados;
- A resistência à compressão foi prejudicada pela adição de RCD à mistura, fato esse mais evidente aos 28 dias. Os valores de compressão obtidos pelos ensaios de CP cilíndricos apontam como pior desempenho os traços com de agregado reciclado vermelho. Contudo, aos 28 dias, formulações com 25% de ARC, ARM e ARV, 50% de ARC e ARM e 100% de ARC apresentam perdas de resistência próximas a 15%, acredita-se que ajustes e correções no traço possam reverter essa perda;
- Com relação à resistência à tração por compressão diametral observou-se que o uso de ARC e ARM não influenciaram nos valores obtidos, independentemente do teor de substituição. Já o ARV, utilizado em 100%, tem influência negativa na mistura, diminuindo a resistência.
- Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade indicam diminuição nos valores encontrados proporcionais ao grau de substituição dos agregados naturais. Essa perda é mais intensa no caso de utilização de agregados cerâmicos (ARV). Contudo, nota-se que na maioria das formulações (seis delas) as perdas apresentadas são de no máximo 20% com relação ao concreto referência;
- Os ensaios de absorção por imersão e índice de vazios no concreto indicam que a adição de RCD prejudica o desempenho dos concretos

fabricados. Tanto a absorção de água quanto o índice de vazios são maiores nos concretos com 100% de agregados reciclados. Dentre os RCD, o que tem maior influência negativa sobre os concretos é o agregado reciclado vermelho, uma vez que resulta em um concreto com maior absorção;

- Os resultados de resistividade elétrica do concreto foram inconclusivos. Não é possível definir qual o efeito da substituição dos AN por RCD. Apesar disso todos os concretos, inclusive o referência, foram avaliados com baixa resistência à corrosão das armaduras;
- Os concretos reciclados apresentam maior resistência ao avanço da frente de carbonatação. Quanto maior a quantidade de resíduos na mistura menor a carbonatação – com exceção da formulação 100% ARV. Infere-se que esse resultado se deva à diminuição do fator A/C com a utilização de RCD com maior absorção de água em relação aos AN.

Diante das análises efetuadas é possível concluir que as formulações com 25% e 50% de ARC e ARM e 25% de ARV são passíveis de serem utilizadas para fabricação de concretos estruturais. Essa constatação se baseia no fato dessas formulações apresentarem pouca diferença de desempenho em relação à formulação de referência com 100% AN. Levando-se em conta os ganhos ambientais essas formulações tornam-se vantajosas.

Com relação a necessidade de segregação do resíduo em ARC e ARV, conclui-se que o ARM – nas proporções de 83,94% ARC e 16,06% ARV – não necessita ser segregado, uma vez que os concretos fabricados com esse tipo de resíduo apresentam características próximas ou superiores às formulações que utilizam agregado reciclado cinza.

Como indicação de estudos futuros, recomenda-se a avaliação de métodos de tratamento dos RCD, de forma que os mesmos tenham suas características e desempenhos melhorados. Outro estudo a ser abordado, pode versar sobre aspectos de durabilidade não abordados no presente estudo, ataque de sulfatos, por exemplo. Indica-se ainda, um estudo específico que avalie a resistividade elétrica de CP em concretos com agregados reciclados graúdos.

6. Referências Bibliográficas

ABBAS, A. *et al.* Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 8, p. 555–563, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.012>>.

ABNT. *NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. *NBR 15575: Edifícios Habitacionais – Desempenho*. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT. *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a.

ABNT. *NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ABNT. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ABNT. *NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ABNT. *NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ABNT. *NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT. *NBR 9204: Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrica volumétrica — Método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT. *NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman*. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ABNT. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ABNT. *NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b.

ABNT. *NBR NM 45: Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ABNT. *NBR NM 51: Ensaio de abrasão “Los Angeles”*. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ABNT. *NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009c.

ABNT. *NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2014*. . São Paulo: [s.n.], 2015. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>>.

AGRELA, F. *et al.* Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 3950 – 3955, 2011.

AMORIM, P.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Concrete made with coarse concrete aggregate: Influence of curing on durability. *ACI Materials Journal*, v. 109, n. 2, p. 195–204, 2012.

ANGULO, S. C. *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos*. 2005. 154 f. Universidade de São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C. *et al.* On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete. *Materials and Structures*, v. 43, p. 519–528, 2009.

ANGULO, S. C.; MUELLER, A. Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity. *Materials and Structures*, v. 42, n. 6, p. 739–748, 2008.

BAIRAGI, N. K.; VIDYADHARA, H. S.; RAVANDE, K. Mix design procedure for recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 4, n. 4, p. 6, 1990.

BAROGHEL-BOUNY, V. *et al.* Easy assessment of durability indicators for service life prediction or quality control of concretes with high volumes of supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 8, p. 832–847, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.007>>.

BHUTTA, M. A. R. *et al.* Properties of porous concrete from waste crushed

concrete (recycled aggregate). *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 1243–1248, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.022>>.

BOGAS, J. A.; DE BRITO, J.; FIGUEIREDO, J. M. Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 89, p. 187–195, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.003>>.

BRASIL. Resolução CONAMA Nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. , 2002, p. 7. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 8, p. 2869–2876, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004>>.

CUNHA, A.; HELENE, P. *Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação*. São Paulo: EPUSP, 2001.

DHIR, R. K.; PAINE, K. A. *Performance Related Approach to Use of Recycled Aggregates*. 1º ed. Banbury: Waste & Resources Action Programme, 2007.

EGUCHI, K. *et al.* Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction. *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 7, p. 1542–1551, 2007.

ERCA. *Boletim Técnico. Fuler RMX*. . Itatiba: [s.n.], 2016.

ETXEBERRIA, M. *et al.* Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 5, p. 735–742, 2007.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, n. 1, p. 9–14, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005>>.

FERREIRA, L.; BARRA, M.; DE BRITO, J. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, v. 63, n. 8, p. 617–627, 2011.

GENG, J.; SUN, J. Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine

aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 49, p. 814–820, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.090>>.

GOMES, M.; BRITO, J.; BRAVO, M. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. *Materials and Structures*, v. 42, n. 5, p. 663–675, 2009.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cement and Concrete Research*, v. 32, n. 8, p. 1301–1311, 2002.

HANSEN T. C. Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete. *ACI Journal*, v. 82, n. 5, p. 648–52, 1985.

HENDRIKS, C. H.; NIJKERK, A. A.; VAN KOPPEN, A. E. *O Ciclo da Construção*. 1ª ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2007.

HOLCIM. *Relatórios de Ensaios de Cimento*. . Belo Horizonte: [s.n.], 2017.

HOPPE, T. F. *Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casaca de arroz*. 2005. Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

IBI. *Manual de utilização de aditivos para concreto dosado em central*. . São Paulo: [s.n.], 2016.

JOHN, V. M. *Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. 2000. Universidade de São Paulo, 2000.

KOU, S. C.; POON, C. S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 35, p. 69–76, 2012a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.032>>.

KOU, S. C.; POON, C. S. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, v. 37, n. 1, p. 12–19, 2012b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.011>>.

KOU, S. C.; POON, C. S.; ETXEBERRIA, M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 2, p. 286–291, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.003>>.

LAFARGE. *Ultra Rápido - CPV ARI Fácil*. Disponível em: <http://www.lafarge.com.br/wps/portal/br/Cimentos_Holcim_Detail?WCM_GLOB

AL_CONTEXT=/wps/wcm/connectlib_br/Site_br/AllProductDataSheet/Holcim_1444852241940/Product>. Acesso em: 25 jan. 2017.

LAGE, E. B. D. *et al.* RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA DO CONCRETO: PARÂMETROS LABORATORIAIS. 2017, Bento Gonçalves: IBRACON, 2017. p. 9.

LEITE, M. B. *Avaliação das Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição*. 2001. 270 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

LEVY, S. M.; HELENE, P. Durability of recycled aggregates concrete: A safe way to sustainable development. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 11, p. 1975–1980, 2004.

LIMBACHIYA, M. C. Coarse recycled aggregates for use in new concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, v. 157, n. 2, p. 99–106, 2004. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/docserver/fulltext/ensu157-099.pdf?expires=1387571166&id=id&accname=id400561&checksum=BC12336E2AD269DC72A45470DA146CF4>>.

LNEC. *E 391. Concreto: Determinação da resistência à carbonatação*. Lisboa: LNEC, 1993.

MATIAS, D. *et al.* Durability of Concrete with Recycled Coarse Aggregates: Influence of Superplasticizers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 6014011, n. 5, p. 1–5, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4ª ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Professional Publishing, 2013.

MEYER, C. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 8, p. 601–605, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>>.

NAGATAKI, S. *et al.* Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 6, p. 965–971, 2004.

OTSUKI, N.; MIYAZATO, S.; YODSUDJAI, W. Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 15, n. 5, p. 443–451, 2003.

PACHECO-TORGAL, F. *et al.* *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*. 1º ed. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2013.

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.

PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste: influence of the crushing process. *Materials and Structures*, p. 1–14, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1617/s11527-014-0456-7>>.

PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. *GB/T 50082 Standard for Test Methods of Long-term Performance and Durability of Ordinary Concrete*. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009.

POON, C. S.; CHAN, D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 50, n. 3, p. 293–305, 2007.

RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 50, n. 1, p. 71–81, 2007.

RICHARDSON, A.; COVENTRY, K.; BACON, J. Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 2–3, p. 272–277, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.09.014>>.

RICHARDSON, A. E.; COVENTRY, K.; GRAHAM, S. Concrete manufacture with un-graded recycled aggregates. *Structural Survey*, v. 27, n. 1, p. 62–70, 2009. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/02630800910941692>>.

RILEM. CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. *RILEM recommendations for the testing and use of constructions materials*, p. 3, 1988.

RILEM. Recommendation I2I-DRG. Guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. Specifications for concrete with recycled aggregates. *Materials and Structures*, v. 27, p. 557–559, 1994.

RIPPER, T. .; SOUZA, D. V. C. M. *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. 1ª ed. São Paulo: PINI, 1998.

RYOU, J. S.; LEE, Y. S. Characterization of Recycled Coarse Aggregate (RCA)

via a Surface Coating Method. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 8, n. 2, p. 165–172, 2014.

SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 5, p. 707–712, 2001.

SALLES, P. V. *et al.* Viability Analysis of Inserting a Mobile Equipment of Construction Waste Recycling in a Residential Building Construction at the Metropolitan Region of Belo Horizonte – Brazil. *International Journal of Engineering & Technology*, v. 16, n. 3, p. 1–7, 2016. Disponível em: <http://ijens.org/Vol_16_I_03/162403-5858-IJCEE-IJENS.pdf>.

SCHNEIDER, D. M. *Deposições Irregulares de Resíduos da Construção Civil na Cidade de São Paulo*. 2003. 130 f. Universidade de São Paulo, 2003.

SHI, C. *et al.* Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 466–472, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615011488>>.

SILVA, R. V. *et al.* Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 62, p. 22–32, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.017>>.

SIM, J.; PARK, C. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. *Waste Management*, v. 31, n. 11, p. 2352–2360, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.014>>.

SLU. *Estações de Reciclagem de Entulho*. Disponível em: <http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade.do?evento=portlet&pIdPlc=ecpTaxonomiaMenuPortal&app=slu&lang=pt_br&pg=5600&tax=34906>. Acesso em: 20 maio 2017.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, NULL, v. 35, p. 1195–1203, 2005.

THOMAS, C. *et al.* Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 40, p. 1054–1065, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106>>.

WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C. D. S.; KULAKOWSKI, M. P. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. *Ambiente Construído (Online)*,

v. 11, p. 213–228, 2011.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, v. 65, p. 67–74, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018>>.

ZEGA, C. J.; DI MAIO, Á. A. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Management*, v. 31, n. 11, p. 2336–2340, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.011>>.

ZHANG, J. *et al.* Performance Enhancement of Recycled Concrete Aggregates through Carbonation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 5, 2015. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001296](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001296)>.

ZHANG, S.; ZONG, L. Properties of Concrete Made With Recycled Coarse Aggregate From Waste Brick. *Environmental science & technology*, v. 33, n. 2, p. 482–489, 2013.

ZHU, Y. G. *et al.* Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 35, n. 1, p. 32–38, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.008>>.

Apêndice I – Tabelas com os Valores Obtidos em Ensaios

As tabelas a seguir se referem aos valores médios apresentados na seção 4.3. Caracterização dos Concretos Fabricados.

Tabela 15: Abatimento do tronco de cone.

Moldagem	Slump (mm)			Média (mm)
CR 1,0% SP-II	215	240	260	238
CR 0,6% SP-II	60	75	90	75
25% ARC	130	160	145	145
25% ARM	100	120	105	108
25% ARV	15	15	15	15
50% ARC	70	80	90	80
50% ARM	60	60	70	63
50% ARV	0	0	0	0
100% ARC	0	0	0	0
100% ARM	0	0	0	0
100% ARV	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 16: Resistência à compressão aos 7 dias.

Moldagem	Resistencia à compressão aos 07 dias (MPa)			Média	Desvio Padrão
	CR	38,76	40,18		
25% ARC	41,66	41,16	42,70	41,84	0,786
25% ARM	42,54	37,25	37,91	39,23	2,883
25% ARV	35,95	34,86	36,40	35,74	0,792
50% ARC	39,54	38,67	39,68	39,30	0,547
50% ARM	40,39	40,34	40,42	40,38	0,040
50% ARV	29,55	31,25	28,40	29,73	1,434
100% ARC	38,40	37,74	37,91	38,02	0,343
100% ARM	35,59	35,64	35,13	35,45	0,281
100% ARV	7,74	6,34	9,08	7,72	1,370

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 17: Resistência à compressão aos 28 dias.

Moldagem	Resistencia à compressão aos 28 dias (MPa)			Média	Desvio Padrão
	CR	49,58	49,82		
25% ARC	39,30	43,84	47,02	43,39	3,880
25% ARM	38,65	43,03	44,89	42,19	3,204
25% ARV	42,85	41,28	42,04	42,06	0,785
50% ARC	42,65	45,29	47,60	45,18	2,477
50% ARM	42,23	45,26	45,45	44,31	1,807

(Continua)

	(Conclusão)				
50% ARV	32,80	33,31	33,94	33,35	0,571
100% ARC	40,50	42,74	42,43	41,89	1,214
100% ARM	35,59	40,03	35,64	37,09	2,549
100% ARV	8,21	8,19	11,82	9,41	2,090

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 18: Resistência à tração aos 28 dias

Moldagem	Resistencia à tração aos 28 dias			Média	Desvio Padrão
	(MPa)				
CR	3,13	2,74	3,31	3,06	0,291
25% ARC	2,90	3,07	2,93	2,97	0,091
25% ARM	2,90	3,18	3,12	3,07	0,147
25% ARV	3,01	2,68	2,18	2,62	0,418
50% ARC	3,46	2,59	2,74	2,93	0,465
50% ARM	2,86	3,25	3,04	3,05	0,195
50% ARV	1,78	2,53	2,72	2,34	0,497
100% ARC	2,91	2,57	3,01	2,83	0,231
100% ARM	2,72	3,28	2,89	2,96	0,287
100% ARV	0,90	2,10	1,25	1,42	0,617

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 19: Módulo estático de elasticidade aos 28 dias.

Moldagem	Módulo estático de elasticidade			Média	Desvio Padrão
	aos 28 dias (GPa)				
CR	31,50	30,50	30,50	30,83	0,577
25% ARC	31,00	32,20	30,60	31,27	0,833
25% ARM	30,20	31,30	29,10	30,20	1,100
25% ARV	29,10	26,00	25,90	27,00	1,819
50% ARC	28,10	27,90	28,50	28,17	0,306
50% ARM	27,50	29,10	29,30	28,63	0,987
50% ARV	24,20	27,20	27,20	26,20	1,732
100% ARC	25,50	27,70	28,20	27,13	1,436
100% ARM	25,50	26,50	24,00	25,33	1,258
100% ARV	10,10	6,80	6,30	7,73	2,065

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 20: Absorção de água

Moldagem				Média	Desvio Padrão
	Absorção de água (%)				
CR	4,81	4,54	4,79	4,71	0,150
25% ARC	6,26	6,20	6,75	6,40	0,302
25% ARM	6,18	6,25	6,06	6,16	0,096

(Continua)

	(Conclusão)				
25% ARV	6,44	6,70	6,37	6,50	0,174
50% ARC	6,27	6,22	6,05	6,18	0,115
50% ARM	6,45	6,08	6,54	6,36	0,244
50% ARV	6,28	7,21	6,83	6,77	0,468
100% ARC	8,32	8,29	8,26	8,29	0,030
100% ARM	8,29	8,61	8,34	8,41	0,172
100% ARV	11,90	14,33	14,97	13,73	1,620

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 21: Índice de vazios.

Moldagem	Índice de vazios (%)			Média	Desvio Padrão
CR	8,02	7,56	7,97	7,85	0,252
25% ARC	10,21	10,03	11,17	10,47	0,613
25% ARM	10,04	10,28	9,80	10,04	0,240
25% ARV	10,57	11,12	10,50	10,73	0,340
50% ARC	10,34	10,26	10,11	10,24	0,117
50% ARM	10,78	10,00	10,76	10,51	0,445
50% ARV	10,56	12,18	11,55	11,43	0,817
100% ARC	13,89	13,83	13,62	13,78	0,142
100% ARM	13,86	13,94	14,26	14,02	0,212
100% ARV	18,68	23,63	24,85	22,39	3,268

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 22: Resistividade elétrica aos 120 dias.

Moldagem	Resistividade Elétrica (Ohm.m)		Média	Desvio Padrão
CR	57,82	56,03	56,93	1,266
25% ARC	89,60	62,02	75,81	19,502
25% ARM	71,32	50,04	60,68	15,047
25% ARV	69,88	67,34	68,61	1,796
50% ARC	96,35	64,07	80,21	22,825
50% ARM	54,64	56,80	55,72	1,527
50% ARV	69,07	111,66	90,37	30,116
100% ARC	113,08	83,33	98,21	21,036
100% ARM	64,58	69,88	67,23	3,748
100% ARV	81,35	100,56	90,96	13,584

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 23: Profundidade de carbonatação aos 45 dias.

Moldagem	Profundidade de carbonatação (mm)				
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão
CR	10,56	10,51	10,68	10,58	0,09
25% ARC	10,91	9,24	7,53	9,23	1,69
25% ARM	9,39	9,57	11,29	10,08	1,05
25% ARV	9,20	7,92	7,39	8,17	0,93
50% ARC	8,40	8,91	8,44	8,58	0,29
50% ARM	8,22	5,81	6,83	6,95	1,21
50% ARV	7,34	6,83	5,71	6,63	0,83
100% ARC	5,02	5,30	5,25	5,19	0,15
100% ARM	4,04	3,46	3,81	3,77	0,29
100% ARV	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 24: Profundidade de carbonatação aos 90 dias.

Moldagem	Profundidade de carbonatação (mm)				
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão
CR	14,69	13,76	13,97	14,14	0,49
25% ARC	12,55	11,23	10,24	11,34	1,16
25% ARM	12,62	11,92	12,13	12,22	0,36
25% ARV	8,25	8,23	8,61	8,36	0,21
50% ARC	8,65	9,14	8,29	8,69	0,43
50% ARM	6,37	7,12	8,31	7,27	0,98
50% ARV	7,03	6,77	6,54	6,78	0,24
100% ARC	5,74	5,77	5,46	5,66	0,17
100% ARM	4,66	4,63	3,70	4,33	0,54
100% ARV	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Anexo I – Caracterização do Cimento Fornecida pela Empresa Fabricante

Tabela 25: Características físicas e químicas do cimento.

Ensaio	Período	16/01/2016	14/12/2016	11/01/2017
		11/12/2016	08/01/2017	05/02/2017
Ensaio Físicos				
# 400 (%)	Média	2,8	2,9	1,8
IT Holcim	Desv. Pad.	0,48	0,99	0,32
	Nº Amostras	8	8	8
Blaine (cm²/g)	Média	4730	4695	4753
NBR NM 16372	Desv. Pad.	67	63	54
	Nº Amostras	8	8	8
Início de Pega (min)	Média	116	121	120
	Desv. Pad.	11	7	5
NBR NM 65	Nº Amostras	8	8	8
Fim de Pega (min)	Média	169	173	173
	Desv. Pad.	11	7	5
NBR NM 65	Nº Amostras	8	8	8
Resistência à Compressão (MPa) - 1 dia NBR 7215	Média	28,1	28,7	28,6
	Desv. Pad.	0,95	0,56	1,12
	Nº Amostras	8	8	8
Resistência à Compressão (MPa) - 3 dias NBR 7215	Média	41,1	41,3	41,4
	Desv. Pad.	0,57	0,46	0,61
	Nº Amostras	8	8	8
Resistência à Compressão (MPa) - 7 dias NBR 7215	Média	46,1	46,4	46,1
	Desv. Pad.	0,42	0,36	0,91
	Nº Amostras	8	8	6
Resistência à Compressão (MPa) - 28 dias NBR 7215	Média	55,1	55,1	
	Desv. Pad.	0,56	0,52	
	Nº Amostras	8	8	
Análise Química (%)				
PF 1000°C	NBR NM 18	3,83	3,74	3,94
SiO₂	NBR 14656	18,92	18,93	
R.I.	NBR NM 15	0,92	0,87	0,91
Al₂O₃	NBR 14656	5,29	5,16	
Fe₂O₃	NBR 14656	2,91	2,96	
CaO	NBR 14656	64,15	64,17	
MgO	NBR 14656	0,70	0,76	0,76
SO₃	NBR 14656	2,87	2,88	2,85
CO₂	NBR NM 20	2,84	2,92	2,95
K₂O	NBR 14656	0,87	0,86	
PF 500°C	IT Holcim	0,66	0,72	0,85
C3A (Teórico)	Equação			
	Bogue	8,08	7,95	7,40

Fonte: Holcim (2017)