

CAMILA LACERDA GOMES

**AVALIAÇÃO MECÂNICA E DE
DURABILIDADE DE CONCRETOS
FABRICADOS COM RESÍDUO DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E CINZA DE
CASCA DE ARROZ**

Dissertação de Mestrado

Departamento de Engenharia Civil

Belo Horizonte, fevereiro de 2019

CAMILA LACERDA GOMES

**AVALIAÇÃO MECÂNICA E DE DURABILIDADE DE CONCRETOS FABRICADOS
COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E CINZA DE CASCA DE
ARROZ**

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.

Orientadora: Profa. Dra. Flávia Spitale Jacques Poggiali

Coorientador: Prof. Dr. Flávio Antônio dos Santos

BELO HORIZONTE

2019

G633a Gomes, Camila Lacerda
Avaliação mecânica e de durabilidade de concretos fabricados com resíduo de construção e demolição e cinza de casca de arroz / Camila Lacerda Gomes. – 2019.
64 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.

Orientadora: Flávia Spitale Jacques Poggiali.

Coorientador: Flávio Antônio dos Santos.

Bibliografia: f. 59-64.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Resíduos como materiais de construção – Teses.
2. Agregados (Materiais de construção) – Avaliação – Teses.
3. Concreto – Mistura – Teses. I. Poggiali, Flávia Spitale Jaques. II. Santos, Flávio Antônio dos. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 691.3

CAMILA LACERDA GOMES

**AVALIAÇÃO MECÂNICA E DE DURABILIDADE DE
CONCRETOS FABRICADOS COM RESÍDUO DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E CINZA DE CASCA DE
ARROZ**

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



Flávia Spitale Jacques Poggiali
Orientador

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Flávio Antônio dos Santos
Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Roberto Braga Figueiredo
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG



Conrado de Souza Rodrigues
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Péter Ludvig
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Belo Horizonte, 04 de fevereiro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela minha vida e por tudo que sou capaz de realizar.

Aos meus pais e irmãos que me sempre me apoiam em todas as minhas escolhas.

Amo muito vocês!

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil que colaboraram para o meu crescimento e ajudaram resolver as questões burocráticas. Agradeço especialmente a minha orientadora Flávia, pela disponibilidade, respeito, confiança e companheirismo.

Aos colegas do mestrado, Pedro, Guilherme, Harley, Diego, que deram muito suporte nas moldagens. Sem vocês não seria possível fazer minhas centenas de corpos de prova. Aos amigos que sempre marcavam presença no cafezinho do “Submundo”, tornando os dias cansativos mais leves.

À equipe do laboratório de Engenharia Civil, Ivan, André e Isabela, que sempre se mostraram disponíveis em ajudar, possibilitando a realização de todos os testes mecânicos nas datas previstas. À Letícia, aluna de iniciação científica, que contribuiu com os ensaios de BET, ao professor Augusto (DET), pela colaboração com o ensaio do MEV e à equipe do DEMAT, pela realização do ensaio de FRX.

Ao CEFET-MG e à CAPES pelo auxílio financeiro.

Às empresas que contribuíram fornecendo materiais para serem utilizados na pesquisa: Pilecco Nobre pelo fornecimento da cinza da casca de arroz, SLU pelo agregado de resíduos de construção e demolição, Lafarge/Holcim pelo cimento, Brasmic pela areia, ERCA pelo aditivo químico, Alkon pelo desmoldante.

“Hakuna Matata”

Ditado popular africano

RESUMO

O uso de agregados provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD) é uma alternativa aos agregados naturais que pode reduzir o descarte desses resíduos. Seu uso ainda é restrito devido às perdas na qualidade do concreto que normalmente ocorrem com a utilização desse tipo de material. As adições minerais são uma alternativa para compensar as perdas ocorridas com os agregados reciclados e manter a qualidade do concreto. Diante dos problemas ambientais que os resíduos e a produção de cimento geram, torna-se importante estudar alternativas de uso do RCD e redução da fabricação. Além de reduzir a demanda por aterros, o uso desses materiais também evita a extração de matéria-prima para a produção de novos concretos, preservando o meio ambiente. A presente pesquisa teve por objetivo avaliar o uso de agregados graúdos produzidos a partir de RCD em substituição ao agregado natural (AN) e o uso de cinza de casca de arroz (CCA) em substituição parcial ao cimento. Os agregados de RCD (ARCD) passaram por um processo de limpeza e separação de contaminantes para que pudessem ser utilizados. Foram realizados ensaios de caracterização do agregado graúdo de acordo com as normas nacionais. A CCA também foi submetida à ensaios para caracterizar sua composição química e propriedades físicas. Os agregados graúdos foram substituídos em 50 e 100%, em volume, e o cimento em 10, 15 e 20%, em peso. As misturas com diferentes proporções de substituição foram testadas através de ensaios mecânicos e de durabilidade para avaliar a viabilidade do seu uso. Os resultados obtidos nos ensaios de compressão e módulo de elasticidade indicam que o uso da CCA contribuiu para melhorar o desempenho mecânico do concreto com ARCD, obtendo acréscimo de 9,2% na resistência à compressão e 5,1% no módulo de elasticidade. Nos ensaios de durabilidade foram obtidos menores percentuais de absorção de água por imersão para as misturas que utilizaram a CCA.

Palavras-chave: Adição mineral; Agregados Graúdos Reciclados; Concreto Reciclado.

ABSTRACT

The use of aggregates from construction and demolition waste (CDW) is an alternative to natural aggregates that can reduce the disposal of these residues. Its use is still restricted due to the losses in the quality of the concrete that normally occur with the use of this type of material. Mineral admixtures are an alternative to compensate for losses occurring with recycled aggregates and maintain the quality of the concrete. Given the environmental problems that waste and cement production generate, it is important to study alternatives to use the RCD and reduce manufacturing. In addition to reducing the demand for landfills, the use of these materials also avoids the extraction of raw material for the production of new concretes, preserving the environment. This research aimed to evaluate the use of coarse aggregates produced from RCD in substitution to the natural aggregate (NA) and the use of rice husk ash (RHA) in partial substitution to cement. Recycled Concrete Aggregates (RCA) have undergone a process of cleaning and separating contaminants so that they could be used. The characterization of the coarse aggregate was carried out according to the national standards. The RHA was also subjected to assays to characterize its chemical composition and physical properties. The coarse aggregates were replaced in 50 and 100%, in volume, and the cement in 10, 15 and 20% by weight. Mixtures with different proportions of substitution were tested by mechanical and durability tests to evaluate the viability of its use. The results obtained in the compression and modulus of elasticity tests indicate that the use of RHA contributed to improve the mechanical performance of the concrete with RCA, obtaining an increase of 9,2% in the compressive strength and 5,1% in the modulus of elasticity. In the durability tests, lower percentages of water absorption were obtained by immersion for the mixtures using RHA.

Key-words: Mineral admixture; Recycled Coarse Aggregates; Recycled concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coleta de RCD no Brasil	17
Figura 2 - Estação de Reciclagem de Entulho da PBH.	27
Figura 3 - Lavagem do agregado reciclado.	28
Figura 4 - Composição do ARCD.	28
Figura 5 - Composição percentual do ARCD.....	29
Figura 6 - Método de Mistura Dupla.	33
Figura 7 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.	36
Figura 8 - Distribuição granulométrica dos agregados graúdos.	37
Figura 9 - Abrasão Los Angeles.	38
Figura 10 - Distribuição granulométrica dos aglomerantes.....	39
Figura 11 - Difração de Raios-X da CCA.....	39
Figura 12 - MEV da CCA (aumento de 100x (A), 500x (B), 1000x (C) e 2000x (D)).	41
Figura 13 - Abatimento do tronco de cone.	42
Figura 14 - Resistência à compressão axial do concreto.	44
Figura 15 - Resistência à compressão axial com AN.	45
Figura 16 - Resistência à compressão axial com 50% de ARCD.....	45
Figura 17 - Resistência à compressão axial com 100% de ARCD.....	46
Figura 18 - Módulo de Elasticidade Estático.....	47
Figura 19 - Módulo de Elasticidade Estático aos 28 dias.	48
Figura 20 - Módulo de Elasticidade Estático aos 91 dias.	48
Figura 21 - Resistência à tração.....	49
Figura 22 - Resistência à tração com AN.	50
Figura 23 - Resistência à tração com 50% de ARCD.....	50
Figura 24 - Absorção de água por imersão.	51
Figura 25 - Absorção de água para misturas contendo apenas AN.	52
Figura 26 - Absorção de água para misturas contendo ARCD.....	53
Figura 26 - Carbonatação acelerada.	54
Figura 27 - Carbonatação aos 45 dias de exposição	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise química do cimento.....	25
Tabela 2 - Características do aditivo superplastificante.....	30
Tabela 3 - Dosagem do concreto.....	31
Tabela 4 - Consumo de materiais.....	31
Tabela 5 - Proporções de substituição realizadas.....	32
Tabela 6 - Resultados do ensaio de peneiramento do agregado miúdo.....	36
Tabela 7 - Propriedades físicas do agregado miúdo.....	36
Tabela 8 - Resultado do ensaio de peneiramento dos agregados graúdos.....	37
Tabela 9 - Propriedades físicas dos agregados graúdos.....	37
Tabela 10 - Propriedades físicas dos aglomerantes.....	39
Tabela 11 - Composição química da CCA.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – Fator água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ACI – *American Concrete Institute*

AN – Agregado natural

ARC – Agregado reciclado de concreto

ARCD – Agregado de resíduos de construção e demolição

CCA – Cinza de casca de arroz

CCA/CE – Cinza de casca de arroz e casca de eucalipto

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

cm - Centímetro

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP – Corpo de prova

DRX – Difração de Raios-X

FRX – Fluorescência de Raios-X

g – grama

GPa – Giga Pascal

kg – Quilograma

kN – Quilonewton

l – Litro

LEED – Leadership in Energy and Environmental Design

m – Metro

mg – Miligrama

mm – Milímetro

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MPa – Mega Pascal

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

nm – nanômetro

RCD – Resíduo de construção e demolição

SP – Superplastificante

SSS – Superfície saturada seca

ZTI – Zona de transição interfacial

LISTA DE SÍMBOLOS

CaCO_3 – Carbonato de cálcio

Ca(OH)_2 – Hidróxido de cálcio

CaO – Óxido de cálcio

CO_2 – Dióxido de carbono

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

H_2O – Água

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	18
2	REVISÃO TEÓRICA	19
2.1	AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS	19
2.2	CINZA DE CASCA DE ARROZ	20
2.3	INFLUÊNCIA DO ARCD E DA CCA NA TRABALHABILIDADE DO CONCRETO FRESCO	21
2.4	INFLUÊNCIA DO ARCD E DA CCA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO	21
2.4.1	Resistência à compressão	21
2.4.2	Módulo de elasticidade estático.....	22
2.4.3	Resistência à tração.....	23
2.5	INFLUÊNCIA DO ARCD E DA CCA NAS PROPRIEDADES DE DURABILIDADE DO CONCRETO	23
2.5.1	Absorção de água	23
2.5.2	Carbonatação.....	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	25
3.1.1	Cimento	25
3.1.2	Agregado miúdo	26
3.1.3	Agregado graúdo natural.....	26
3.1.4	Agregado graúdo de RCD.....	26
3.1.5	Cinza de Casca de Arroz.....	29
3.1.6	Aditivo superplastificante.....	30
3.1.7	Água	30
3.2	MÉTODOS UTILIZADOS	30
3.2.1	Dosagem do concreto.....	30
3.2.2	Confecção do concreto.....	32

3.2.3	Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone	33
3.2.4	Confeção e cura dos corpos de prova	33
3.2.5	Ensaio de resistência à compressão	34
3.2.6	Ensaio de módulo estático de elasticidade	34
3.2.7	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	34
3.2.8	Ensaio de absorção de água por imersão	35
3.2.9	Ensaio de carbonatação acelerada	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	AGREGADO MIÚDO	36
4.2	AGREGADO GRAÚDO	37
4.3	CIMENTO E CCA	38
4.4	TRABALHABILIDADE DO CONCRETO	41
4.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DO CONCRETO	43
4.6	MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO	47
4.7	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	49
4.8	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	51
4.9	CARBONATAÇÃO ACELERADA	53
5	CONCLUSÕES	56
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

O uso de agregados feitos a partir de resíduos de construção e demolição (RCD) ainda não tem grande aceitação em concretos para fins estruturais. Isto ocorre devido aos resultados inferiores de desempenho quando comparado aos concretos com agregados naturais (AN) e ao conhecimento restrito do seu impacto na durabilidade a longo prazo (MARINKOVIĆ *et al.*, 2010; LOTFY e AL-FAYEZ, 2015). Como a obtenção dos resíduos não é padronizada, a sua composição varia, produzindo agregados com propriedades diferentes entre lotes distintos, prejudicando a confiabilidade de resultados e, conseqüentemente, sua utilização.

Para tentar mitigar os efeitos negativos, alguns subprodutos industriais podem ser utilizados nas misturas de concreto como adições minerais, melhorando o seu desempenho. Isto depende principalmente das características físicas e químicas apresentadas por esses subprodutos, podendo além disso, reduzir o custo e os efeitos ambientais negativos (SAFIUDDIN *et al.*, 2010; MADANDOUST *et al.*, 2011; SARAVANAN e SIVARAJA, 2016). A combinação de adições minerais com o uso de agregados de RCD (ARCD) pode gerar concretos com propriedades aceitáveis, inclusive para fins estruturais (RADONJANIN *et al.*, 2013).

Com o crescimento do acesso à informação, as pessoas estão mais preocupadas com o futuro do planeta e os impactos ambientais causados pelas atividades desenvolvidas, cobrando que os governos adotem e implementem o conceito de desenvolvimento sustentável (SILVA *et al.*, 2017). A partir da criação de leis, regulamentações e das certificações de qualidade das construções, como o sistema LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), as empresas são pressionadas a se preocupar com os problemas ambientais, gerando novos investimentos para melhoria dos processos de produção e da gestão de resíduos (MEYER, 2009).

A utilização de resíduos como substituição à matéria prima pode minimizar as emissões geradas na fabricação de novos produtos e também reduzir ou até eliminar a necessidade de aterros para descarte desses resíduos (RAMASAMY, 2012).

O descarte de RCD é um grande problema econômico e ambiental para a indústria da construção civil. A reutilização do RCD pode gerar economia ao reduzir os custos de descarte e gerar materiais reciclados mais baratos que os naturais. O uso do RCD

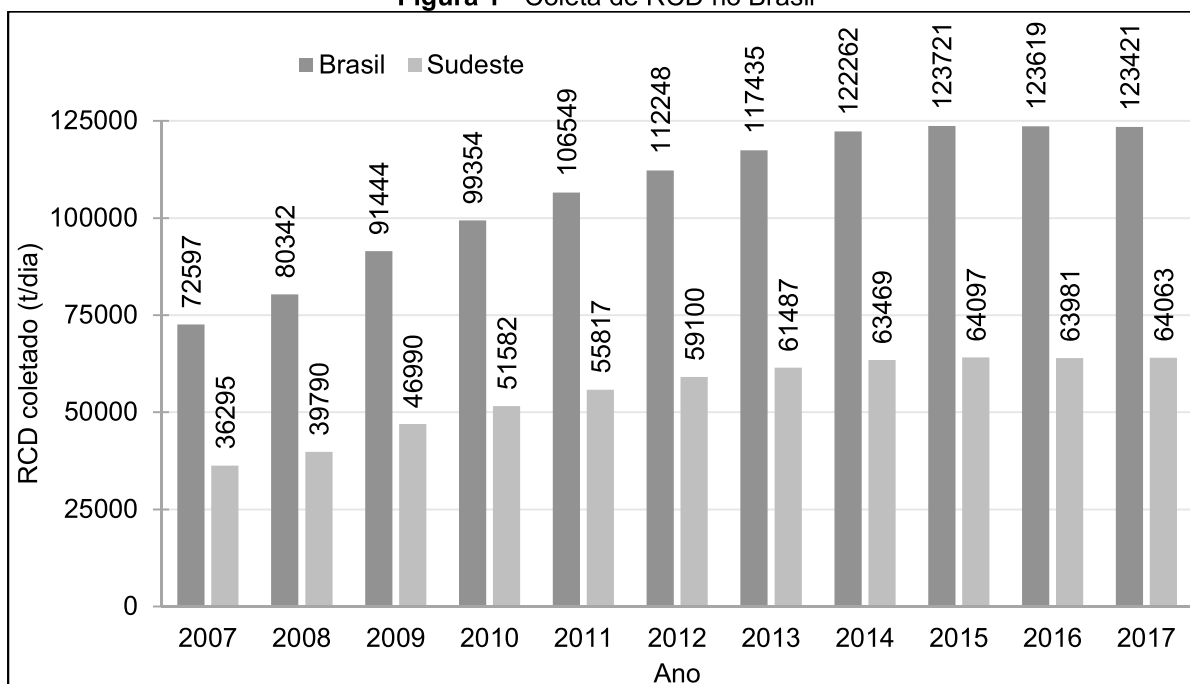
como agregados também reduz a extração de matérias primas, reduzindo a poluição gerada por essa atividade (NIXON, 1978; OIKONOMOU, 2005; MALEŠEV *et al.*, 2010; LOTFY e AL-FAYEZ, 2015).

A indústria agropecuária produz grande quantidade de subprodutos que podem ser utilizados na construção civil, como a cinza de casca de arroz que já é comercializada para este fim. As cascas de arroz que sobram do beneficiamento dos grãos são aproveitadas como combustível para produção de energia em usinas termoelétricas. As cinzas geradas nesse processo de queima controlada geralmente são ricas em sílica amorfa, sendo aproveitada como adição mineral para a produção de concreto (FERNANDES *et al.*, 2016).

A utilização de adições minerais em matrizes cimentícias poderia reduzir a quantidade de cimento utilizado e, conseqüentemente, sua produção e as emissões de poluentes relacionados ao aquecimento global e às mudanças climáticas (RAMEZANIANPOUR *et al.*, 2009), por se tratar de um dos principais contribuintes nessas emissões, sendo sua redução de grande importância para a preservação ambiental.

No Brasil, a Resolução Nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (BRASIL, 2002) estabelece as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. A partir da criação dessa resolução que pode ser percebido uma preocupação do setor com os resíduos gerados.

Entre os anos de 2007 e 2017, a coleta de RCD no Brasil aumentou mais de 50%. Enquanto isso, a região Sudeste apresentou aumento acima de 60% e representa atualmente mais da metade do RCD coletado no país. A Figura 1 apresenta os dados de RCD coletado nesse período, extraídos do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, lançado anualmente pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2009-2018). Diante dessa grande produção de RCD, é importante que a maior parcela possível seja reutilizada para reduzir os impactos da construção civil.

Figura 1 - Coleta de RCD no Brasil

Fonte: Adaptado de (ABRELPE, 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014; 2015; 2016; 2017; 2018).

Com base na necessidade de viabilizar o uso de ARCD em concreto para fins estruturais, obtendo um concreto mais sustentável, esta pesquisa visa avaliar o desempenho mecânico e de durabilidade de concreto feito com agregados graúdos de RCD em substituição aos agregados graúdos naturais (50% e 100%, em volume) e adições minerais de cinza de casca de arroz (CCA) em substituição parcial do cimento Portland (10%, 15% e 20%, em peso).

Esses valores foram escolhidos com base na revisão da literatura, que mostra que com o uso de pequenas quantidades de ARCD (até 30% de agregados graúdos de RCD) ainda é possível fabricar concretos com bom desempenho mecânico (ETXEBERRIA *et al.*, 2007; CHAKRADHARA RAO *et al.*, 2011; LOTFY e AL-FAYEZ, 2015) não sendo necessário uso de outros materiais para compensar as perdas. Também é observado na literatura que o uso de CCA em porcentagens maiores que 20% não proporcionam ganhos significativos nas propriedades do concreto (GANESAN *et al.*, 2008; MUTHADHI e KOTHANDARAMAN, 2013), fazendo com que percentuais mais elevados não sejam suficientes para mitigar os impactos negativos do uso do ARCD.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o desempenho mecânico e de durabilidade de concretos utilizando altas taxas de substituições de agregados graúdos naturais por ARCD e substituições parciais de cimento Portland por CCA.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar as propriedades físicas do ARCD e comparar aos resultados obtidos para os agregados naturais e aos requisitos da Norma Brasileira NBR 7211 (ABNT, 2009A);
- Avaliar a influência do teor de ARCD e CCA no concreto fresco (*slump*);
- Avaliar a influência do teor de ARCD e CCA nas propriedades mecânicas do concreto através de ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade estático e resistência à tração por compressão diametral;
- Avaliar a influência do teor de ARCD e CCA na durabilidade do concreto através de ensaios de absorção de água por imersão e carbonatação acelerada.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS

O primeiro uso extensivo e documentado de resíduos de construção e demolição foi durante e logo após a Segunda Guerra Mundial, onde países como Grã-Bretanha e Alemanha acumulavam grandes quantidades de resíduos originados de bombardeios e de demolições de fortificações de guerra. Esses países precisavam facilitar a sua reconstrução e eliminar os resíduos deixados pela guerra (NIXON, 1976; 1978).

Após esse período, as pesquisas para uso de RCD foram iniciadas de maneira ainda restrita. Seu uso normalmente é feito como material de sub-base ou base granular em obras rodoviárias, como material de enchimento em terraplanagem e na fabricação de blocos de pavimentação (OIKONOMOU, 2005).

Com o passar do tempo, a escassez de recursos naturais e a preocupação com o meio ambiente fizeram com que as pesquisas evoluíssem e atualmente temos várias informações sobre o uso desses resíduos para fabricação de concreto documentadas na literatura. Alguns pesquisadores, como Bairigi *et al.* (1993) e Padmini *et al.* (2009), reproduzem os resíduos em laboratório, utilizando apenas resíduos provenientes de concreto feito em laboratório e sem contaminação. Outras pesquisas, como as de Ferreira *et al.* (2011) e Zhu *et al.* (2013), utilizam resíduos produzidos por usinas de reciclagem, apresentando alguma porcentagem de resíduos de outras origens, como materiais cerâmicos.

Países como Alemanha, Japão, Reino Unido e Holanda possuem normas e regulamentações sobre o uso de agregados de RCD em concreto estrutural. Na Alemanha, o uso dos agregados segue a normatização DIN 4226-100 do *Deutsches Institut für Normung* (2002) e as diretrizes do *German Committee of Reinforced Concrete* (DAfStb, 2004). No Japão são seguidos os parâmetros estabelecidos pela *Japanese Standards Association* através da JIS A 5021 (2005), JIS A 5022 (2006) e JIS A 5023 (2007). O Reino Unido utiliza o padrão estabelecido pela *British Standard BS 8500:2 'Concrete – Complementary British standard to BS EN 206-1 – Part 2: Specification for constituent materials and concrete'*. Na Holanda, concreto com até 20% de agregados reciclados são considerados como equivalentes ao concreto com agregados naturais, para substituições acima desse percentual deve ser utilizada as recomendações da *RILEM TC 121-DRG* (GONÇALVES e BRITO, 2010).

No Brasil, a utilização de ARCD é permitida somente em pavimentação e concreto sem função estrutural, sendo os requisitos desses usos definidos pela NBR 15116 (ABNT, 2004). Atualmente não existe nenhuma norma específica para o uso de RCD como agregado para produção de concreto estrutural.

2.2 CINZA DE CASCA DE ARROZ

As adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, normalmente adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes, que variam de 20 a 70% por massa do material cimentício total (MEHTA E MONTEIRO, 2008). As adições podem ser materiais naturais ou subprodutos industriais ou agrícolas.

A utilização das adições minerais pode melhorar algumas características do concreto como a resistência final, fortalecimento da zona de transição interfacial e a durabilidade. Outro importante aspecto da sua utilização está relacionado com questões ambientais, uma vez que muitas das adições são subprodutos industriais ou agrícolas, como escórias, cinzas de casca de arroz, cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e cinzas volantes (GASTALDINI *et al.*, 2007; KHAN *et al.*, 2012).

Além disso, a substituição de parte do cimento por subprodutos, industriais ou agrícolas, elimina a necessidade de aterros para descarte desses materiais. Essa prática irá reduzir o consumo de cimento Portland, que é o componente responsável pela maior parte de emissões de poluentes na fabricação do concreto, reduzindo a emissão dos gases do efeito estufa que aconteceria com sua produção (SAFIUDDIN *et al.*, 2010; GURSEL *et al.*, 2016).

De acordo com a classificação proposta por Mehta e Monteiro (2008), baseada nas características pozolânicas e/ou cimentantes das adições, a CCA é uma pozolana altamente reativa, sendo constituída essencialmente de sílica pura na forma não-cristalina.

A cada tonelada de arroz colhido são produzidos 200 kg de casca, que produzem 40 kg de cinza, aproximadamente (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Essa elevada quantidade de resíduos demandaria grandes áreas de aterro.

As cascas de arroz são queimadas nas usinas de beneficiamento do arroz e também em usinas termoelétricas. A queima controlada em temperaturas entre 500 e 700°C origina um material amorfo com estrutura porosa (NEVILLE, 2016). Quando queimada de maneira não-controlada, a cinza produzida apresenta grande quantidade

de minerais de sílica cristalina e precisa ser finamente moída para obter alguma atividade pozzolânica (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A CCA é considerada uma pozzolana altamente reativa, ou superpozzolana, quando produzida por combustão controlada. Esse efeito pozzolânico melhora algumas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, além de reduzir custos e poluição ambiental causada pelo descarte dos resíduos (BUI *et al.*, 2005).

2.3 INFLUÊNCIA DO ARCD E DA CCA NA TRABALHABILIDADE DO CONCRETO FRESCO

O uso do ARCD no concreto provoca redução na trabalhabilidade da mistura, atribuída à alta capacidade de absorção desse tipo de agregado (BAIRAGI *et al.*, 1993; PADMINI *et al.*, 2009; YONG e TEO, 2009). Bairagi *et al.* (1993) observaram que a perda da trabalhabilidade é progressivamente maior nos 10 primeiros minutos da mistura à medida que a taxa de substituição do ARCD aumenta. Yong e Teo (2009) recomendam o uso de ARCD no estado de superfície saturada seca (SSS) para melhorar a trabalhabilidade do concreto fresco.

A trabalhabilidade das misturas de concreto com adição de CCA também sofre redução, necessitando de maior quantidade de água para manter a mesma consistência da mistura referência (GANESAN *et al.*, 2008; KHAN *et al.*, 2012). Ganesan *et al.* (2008) explicam que a necessidade do acréscimo de água ocorre devido à natureza higroscópica e à área superficial específica da CCA, que é maior que do cimento.

2.4 INFLUÊNCIA DO ARCD E DA CCA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

2.4.1 Resistência à compressão

Estudos realizados com utilização de ARCD em proporções de substituição até 30% não apresentaram redução significativa na resistência à compressão do concreto (BAIRAGI *et al.*, 1993; FERREIRA *et al.*, 2011; LOTFY e AL-FAYEZ, 2015). Para substituições em proporções mais elevadas, a qualidade do ARCD afeta diretamente a resistência do concreto fabricado (POON *et al.*, 2004; MALEŠEV *et al.*, 2010; DUAN e POON, 2014; KOU e POON, 2015).

A maior quantidade de ARCD gera ligações mais fracas que as criadas com o uso do AN, enfraquecendo a interface entre o agregado graúdo e a matriz cimentícia

(BAIRAGI *et al.*, 1993). Ao utilizar ARCD de origem controlada, proveniente de concreto de classes mais elevadas e com menor quantidade de argamassa aderida, ocorre uma melhoria na zona de transição interfacial (ZTI), minimizando as perdas de resistência decorrente da substituição do AN (POON *et al.*, 2004; MALEŠEV *et al.*, 2010; KOU e POON, 2015).

A utilização da CCA, em proporções entre 5% e 30% de substituição ao cimento, apresentaram resultados de resistência à compressão equivalentes ou superiores ao da mistura referência (GANESAN *et al.*, 2008; HABEEB e MAHMUD, 2010; MUTHADHI e KOTHANDARAMAN, 2013). Ganesan *et al.* (2008) atribuem os ganhos de resistência ao efeito pozolânico, proporcionado pela grande quantidade de sílica amorfa presente na composição da CCA, e à finura das partículas. Habeeb e Mahmud (2010) destacam que efeito de microfíler das partículas de CCA aprimora a estrutura dos poros da pasta de cimento.

Prameetthaa *et al.* (2015) obtiveram concretos com resistência similar ao concreto controle ao utilizar ARCD, produzido em laboratório, junto com CCA nas misturas. Os autores explicam que a sílica presente na CCA reage com o hidróxido de cálcio formado no processo de hidratação do cimento, formando um gel C-S-H adicional, que preenche os poros presentes na argamassa aderida ao ARCD.

2.4.2 Módulo de elasticidade estático

O módulo de elasticidade está relacionado à pasta de cimento hidratada, ligação pasta/agregado e características do agregado, como sua porosidade, textura, forma e composição mineralógica (LEITE, 2001).

Por ser mais poroso que o AN, as misturas contendo ARCD tendem a apresentar uma redução linear no módulo de elasticidade com o aumento da proporção substituição do AN pelo ARCD (BAIRAGI *et al.*, 1993; FAN *et al.*, 2014). Entretanto, quando o ARCD é proveniente de concreto de alto desempenho, sua maior qualidade reduz a diferença entre o concreto com ARCD e o fabricado com AN (ANDREU e MIREN, 2014).

As perdas observadas no módulo de elasticidade com uso do ARCD podem ser reduzidas quando a CCA é incorporada ao concreto. Prameetthaa *et al.* (2015) relataram 9% de ganho no módulo de elasticidade da mistura contendo 8% de CCA em comparação à mistura sem uso da adição em concretos contendo ARCD. Essa

melhoria observada é atribuída à melhoria na estrutura de poros, empacotamento de partículas e redução do Ca(OH)_2 presente na argamassa aderida do ARCD e na pasta de cimento do concreto com agregados reciclados (PRAMEETTHAA *et al.*, 2015).

2.4.3 Resistência à tração

Ramezaniapour *et al.* (2009) estudaram a substituição de cimento por CCA no concreto e obtiveram melhores resultados de resistência à tração para as misturas que utilizavam a adição mineral quando comparadas à mistura de referência. Os melhores resultados são atribuídos pelos autores à melhoria da microestrutura da pasta, que se tornou mais homogênea e densa devido às reações pozolânicas e ao efeito de enchimento proporcionados pela CCA.

Prameetthaa *et al.* (2015) observaram que a ruptura do concreto testado ocorreu ao longo da zona interfacial, tendo acontecido com uma menor carga no concreto com ARCD que o de referência. Tal fato pode ser devido à ligação mais fraca entre o ARCD, a argamassa aderida e a nova argamassa. Ao incorporar a CCA nas misturas, foi observado melhoria na resistência, equiparando à mistura de referência. Essa melhoria pode ter ocorrido devido ao fortalecimento da ZTI proporcionada pelo C-S-H adicional formado nas reações pozolânicas.

2.5 INFLUÊNCIA DO ARCD E DA CCA NAS PROPRIEDADES DE DURABILIDADE DO CONCRETO

2.5.1 Absorção de água

A taxa de absorção de água é um importante indicador da qualidade do concreto e da sua potencial durabilidade, uma vez que concretos com altos índices de absorção estão mais propensos à penetração de agentes agressivos (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Neville (2016) destaca que a maioria dos bons concretos tem absorção inferior 10%, em massa.

A absorção depende da porosidade da matriz cimentícia do concreto. Para concretos com ARCD, a matriz do concreto original e do novo irão influenciar essa propriedade (MALEŠEV *et al.*, 2010). Diante disto, a absorção de água do concreto depende da quantidade de ARCD utilizado, uma vez que este se apresenta mais poroso que os agregados naturais (SOARES *et al.*, 2014).

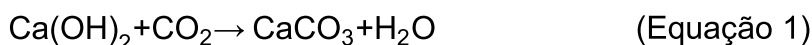
Com o uso da CCA nas misturas de concreto, Givi *et al.* (2010) observaram redução da absorção em idades mais avançadas, ao comparar com a mistura de referência, sendo esta redução atribuída à reação pozolânica e ao efeito de enchimento fornecido pelo uso da CCA.

Utilizando ARCD e CCA nas misturas, Prameetthaa *et al.* (2015) observaram que a absorção das misturas foi menor que a mistura com ARCD e sem uso da adição mineral, indicando melhoria na durabilidade do concreto.

2.5.2 Carbonatação

A carbonatação é um fenômeno que ocorre devido às reações químicas entre o dióxido de carbono (CO₂) com hidróxidos presentes no concreto, formando carbonatos que reduzem o pH do concreto para até 8,5. Essa redução no pH do concreto favorece a destruição da camada de passivação das armaduras, deixando-as expostas (PCA, 2002).

A Equação 1 mostra a reação do CO₂ com o hidróxido de cálcio, formando o carbonato de cálcio.



Neville (2016) explica que o ingresso do CO₂ na estrutura do concreto ocorre por difusão através do sistema de poros e é influenciado pelo preenchimento dos poros pela água, que pode tornar o processo mais lento ou mais rápido. Desta forma, a concentração de CO₂, a permeabilidade do concreto e a umidade relativa do ar são fatores que influenciam a velocidade que a carbonatação avança nas estruturas de concreto.

A carbonatação em concretos com uso de ARCD apresentam resultados distintos na literatura. Estudos como de Soares *et al.* (2014) e Levy e Helene (2004) relataram redução da profundidade carbonatada, sendo essa redução atribuída ao aumento da reserva alcalina no concreto, que atua protegendo a superfície do concreto contra a carbonatação. Outros estudos, como de Otsuki *et al.* (2003) e Xiao *et al.* (2012), apontam aumento na profundidade, atribuída à maior porosidade do concreto com ARCD.

Com relação ao uso da CCA, Gastaldini *et al.* (2007) obtiveram melhores resultados de resistência à carbonatação com a adição que o alcançado pela mistura de referência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados para a confecção das misturas de concreto são o cimento CPV-ARI, cinza de casca de arroz (CCA), areia natural mista, brita gnaisse nº1, brita de RCD nº1 e aditivo superplastificante (SP).

A metodologia de caracterização de cada material é apresentada nos próximos itens e seguem as referências normativas nacionais, quando disponíveis.

3.1.1 Cimento

O estudo visa observar os efeitos de substituições de agregados e aglomerantes, por isso é importante que o cimento utilizado contenha o mínimo possível de adições. A partir dessa consideração, foi escolhido o CPV-ARI fabricado pelo grupo Lafarge/Holcim.

A análise química fornecida pelo fabricante através de relatório técnico é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise química do cimento.

Ensaio	Período	18/11/2017 13/12/2017	16/12/2017 09/01/2018	12/01/2018 06/02/2018	Limites NBR5733
PF 1000°C	NBR NM 18	3,92	4,03	3,84	≤ 4,5
SiO₂	NBR 14656	18,76	18,85	-	-
R.I.	NBR NM 15	0,61	0,60	-	≤ 1,0
Al₂O₃	NBR 14656	4,87	4,67	-	-
Fe₂O₃	NBR 14656	3,09	3,07	-	-
CaO	NBR 14656	64,50	64,82	-	-
MgO	NBR 14656	0,70	0,70	0,70	-
SO₃	NBR 14656	2,93	2,90	2,99	≤ 4,5
CO₂	NBR NM 20	2,82	2,97	2,96	≤ 3,0
K₂O	NBR 14656	0,66	0,77	-	-
PF 500°C	IT Holcim	0,69	0,67	-	-
C₃A (Teórico)	Equação Bogue	7,46	7,11	6,84	-

Fonte: Lafarge/Holcim (2018).

A análise da granulometria foi realizada por meio de difração a laser, utilizando o equipamento CILAS Particle Size Analyzer 1090. O ensaio foi realizado por via úmida com uso de álcool isopropílico.

A densidade foi determinada através do ensaio de picnometria com gás hélio, utilizando o equipamento Quantachrome Multipycnometer. Foram realizadas 15 medições para obter uniformidade nas leituras e os últimos 10 resultados foram utilizados para cálculo da média.

A área superficial foi determinada por ensaio de Adsorção de nitrogênio com a metodologia BET (Brunauer, Emmett, Teller), utilizando o equipamento NOVA 2200e da Quantachrome Instruments.

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia lavada mista, fornecida pela empresa Brasmic Mineração Areia e Brita Ltda.

A análise granulométrica do material foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). O ensaio nas peneiras com vibração mecânica foi repetido duas vezes.

O ensaio de massa específica foi realizado de acordo com a NBR 9776 (ABNT, 1987). A massa unitária e volume de vazios foram determinados de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006).

3.1.3 Agregado graúdo natural

O agregado graúdo natural utilizado foi a brita de gnaiss número 1, fornecida pela Construtora Martins Lanna Ltda.

A análise granulométrica do material foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). O ensaio nas peneiras com vibração mecânica foi repetido duas vezes e os resultados apresentados são a média das duas repetições.

Os ensaios de massa específica, massa específica aparente e absorção de água para o agregado graúdo foram realizados em conformidade com a norma NBR NM 53 (ABNT, 2009c). A determinação da massa unitária e do volume de vazios foi realizada de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006).

A determinação da perda por abrasão foi realizada através do ensaio de abrasão “Los Angeles” de acordo com a NBR NM 51 (ABNT, 2001).

3.1.4 Agregado graúdo de RCD

O agregado de RCD utilizado foi obtido no dia 29 de setembro de 2017 na Estação de Reciclagem de Entulho da Prefeitura de Belo Horizonte, localizada na BR-040 e gerida pela Superintendência de Limpeza Urbana (SLU). Um estudo realizado por Salles (2018) com agregados produzidos pela mesma usina mostraram que o material não apresenta alterações significativas na composição ao longo do tempo (período de 1 ano), dispensando que fossem realizadas coletas em diferentes datas. A Figura 2 apresenta a pilha de agregados onde foi feita a coleta.

Figura 2 - Estação de Reciclagem de Entulho da PBH.



Fonte: arquivo pessoal.

Os resíduos foram armazenados primeiramente em tambores metálicos até o dia em que foram lavados e feita a separação dos contaminantes. Os agregados reciclados apresentavam grande quantidade de material fino aderido, principalmente solo, e estavam molhados pela chuva. Também haviam materiais considerados contaminantes, como madeira, plástico, vidro, metais e gesso.

A lavagem foi realizada utilizando uma máquina de pressão de água para ajudar na retirada no material aderido. Os agregados foram depositados em uma peneira e receberam um jato de água para retirar as partículas de impurezas que já estavam soltas entre o agregado.

Após esse primeiro jato de água, o material foi depositado em um vasilhame e recebeu o jato de água da máquina por cerca de 1 minuto. A água com partículas em suspensão foi retirada e o processo repetido. Após as repetições, o material foi depositado novamente na peneira onde recebeu um novo jato de água para retirar o restante das partículas finas. A Figura 3 apresenta uma amostra do material antes de ser lavado, à esquerda, e após receber o primeiro jato de água, à direita.

Após a lavagem, os resíduos foram espalhados para secar em temperatura ambiente por um período de 5 dias. O local era coberto e arejado, com incidência de raios solares durante 3 horas por dia, no período da tarde.

Depois de seco, o restante do material contaminante foi retirado e os agregados foram armazenados em tambores plásticos dentro do Laboratório de Estruturas e Construção Civil do CEFET-MG. No dia da moldagem foi realizado um peneiramento para retirar as partículas finas que ainda pudessem estar presentes.

Figura 3 - Lavagem do agregado reciclado.



Fonte: arquivo pessoal.

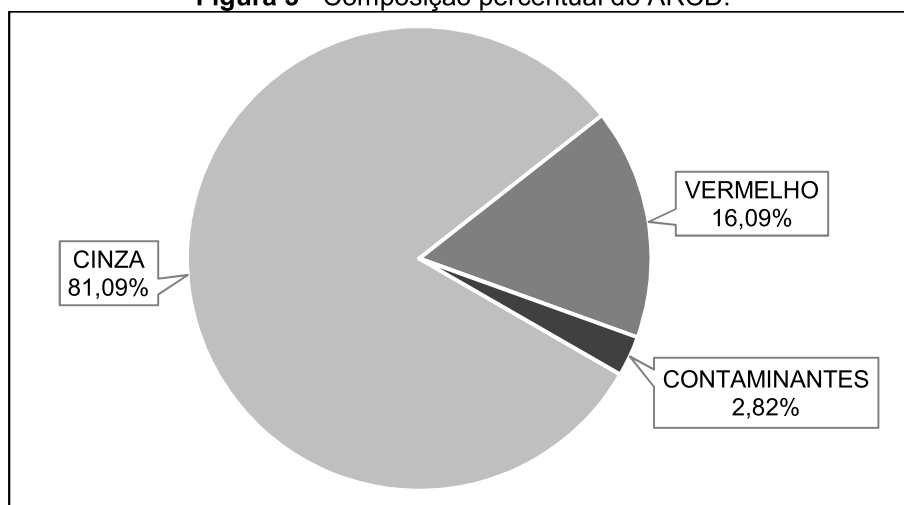
O agregado, após a lavagem, era composto por rochas, materiais cimentícios, materiais cerâmicos, rochas com materiais cimentícios aderidos, cerâmicas com materiais cimentícios aderidos e contaminantes diversos. Foi denominado como parte cinza a fração que apresenta rochas, materiais cimentícios e rochas com materiais cimentícios aderidos. A parte vermelha é a fração composta pelos materiais cerâmicos puros e cerâmicos com materiais cimentícios aderidos. A Figura 4 apresenta amostras das frações que constituem o ARCD.

Figura 4 - Composição do ARCD.



Fonte: arquivo pessoal.

Os percentuais encontrados na composição do agregado estão apresentados na Figura 5. A parcela de contaminantes presente no material foi de 2,82%. A fração cinza representa 81,09% da composição do ARCD, enquanto a fração vermelha representa 16,09%. Os valores obtidos por Salles (2018) para o ARCD obtido da mesma fonte no ano de 2016 foram de 2,32% de contaminantes, 82% cinza e 15,68% vermelho. Esses valores demonstram a uniformidade das frações que compõem o ARCD ao longo do tempo.

Figura 5 - Composição percentual do ARCD.

Fonte: a autora.

Após o processo de limpeza e separação de contaminantes, os agregados foram caracterizados para utilização no concreto.

A análise granulométrica do material foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Os ensaios de massa específica, massa específica aparente e absorção de água foram realizados em conformidade com a norma NBR NM 53 (ABNT, 2009c). A determinação da massa unitária e do volume de vazios foi realizada de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006).

A determinação da perda por abrasão foi realizada através do ensaio de abrasão “Los Angeles” de acordo com a NBR NM 51 (ABNT, 2001).

3.1.5 Cinza de Casca de Arroz

A cinza de casca de arroz utilizada nas misturas foi a cinza comercial Silcca Nobre, fornecida pela empresa Sílica Verde do Arroz Ltda.

Para determinação da composição mineralógica da CCA foi realizado o ensaio de Difração de raios X (DRX), utilizando o Difratorômetro de raios X Shimadzu XRD-7000 com os seguintes parâmetros de ensaio: faixa de varredura de 5° a 80°, velocidade de 1°/min, passo de amostragem de 0,02°, comprimento de onda 2θ, radiação de cobre, tensão de 40 kV e corrente de 30 mA.

Para determinação da composição química foram realizados os ensaios de Espectrometria de Fluorescência de raios X (FRX) e Perda ao Fogo, este seguindo as orientações da NBR NM 18.

Para avaliar a estrutura celular e a geometria da CCA foi utilizada a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

A análise granulométrica da CCA foi realizada por meio de difração a laser utilizando o equipamento CILAS Particle Size Analyzer 1090. O ensaio foi realizado por via úmida com uso de água.

Para determinar a densidade foi realizado o ensaio de picnometria com gás hélio, utilizando o equipamento Quantachrome Multipycnometer. Foram realizadas 15 medições para obter uniformidade nas leituras e os últimos 10 resultados foram utilizados para cálculo da média.

Para determinar a área superficial foi realizado o ensaio de Adsorção de nitrogênio com a metodologia BET (Brunauer, Emmett, Teller) utilizando o equipamento NOVA 2200e da Quantachrome Instruments.

Para avaliar a atividade pozolânica da CCA utilizada foi realizado o ensaio de Chapelle Modificado seguindo as recomendações da NBR 15895 (ABNT, 2010).

3.1.6 Aditivo superplastificante

O aditivo químico utilizado foi o superplastificante (SP) a base de policarboxilatos Fluxer RMX 7350, classificado como superplastificante tipo II retardador de pega (SP-II R) e fornecido pela Erca Brasil. As características desse SP estão apresentadas na Tabela 2 e foram obtidas do boletim técnico disponibilizado pelo fabricante.

Tabela 2 - Características do aditivo superplastificante.

Produto	Tipo	Característica	Aspecto líquido	Dosagem sugerida	Densidade (g/cm³)
Fluxer RMX 7350	SP-II R	Redução de até 40% de água, alta manutenção de trabalhabilidade e alta resistência inicial	Castanho claro	0,5 a 1,1%	1,08 a 1,12

Fonte: Erca Brasil (2017).

3.1.7 Água

A água utilizada foi a fornecida pelo sistema de abastecimento municipal, sob responsabilidade da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA MG).

3.2 MÉTODOS UTILIZADOS

3.2.1 Dosagem do concreto

O método de dosagem utilizado foi o do *American Concrete Institute* (ACI), considerando uma resistência de 35 MPa. Optou-se por este método devido ao seu

uso disseminado nacionalmente. Um estudo realizado Bairagi *et al.* (1990) avaliou o uso de quatro métodos de dosagem utilizados em concretos convencionais e concluiu que o método do ACI foi o que apresentou maiores resultados de resistência à compressão para concretos com agregados reciclados.

O traço definido para as misturas da pesquisa está apresentado na Tabela 3 e o consumo de materiais para confecção de um metro cúbico de concreto é apresentado na Tabela 4.

Tabela 3 - Dosagem do concreto.

	Cimento	Areia	Brita	Água
Traço	1	1,76	3,15	0,55

Fonte: a autora.

Tabela 4 - Consumo de materiais.

Consumo de água (l/m³)	200
Consumo de cimento (kg/m³)	364
Consumo de agregado graúdo (kg/m³)	1148
Consumo de agregado miúdo (kg/m³)	639

Fonte: a autora.

Com base na revisão da literatura (ETXEBERRIA *et al.*, 2007; CHAKRADHARA RAO *et al.*, 2011; LOTFY e AL-FAYEZ, 2015), é percebido que com o uso de até 30% de agregados RCD ainda é possível fabricar concretos com boa qualidade, o que dispensa o uso das adições minerais para obter resultados compatíveis com o concreto de referência. A partir dessa informação, são propostas substituições em volume dos agregados graúdos naturais em 50% e 100% por agregados de RCD, de forma a tornar mais evidente o efeito da CCA em concretos com ARCD.

A literatura também mostra que o uso de CCA em porcentagens entre 10% e 20% apresentam melhores resultados nas propriedades do concreto, sendo as proporções de 10%, 15% e 20% utilizadas neste trabalho para as substituições em massa do cimento Portland por CCA.

O consumo de SP é definido como um percentual do peso de cimento utilizado. Para o concreto de referência foi utilizado 0,3% de SP, para as misturas contendo CCA e AN foi utilizado 0,5% e para o concreto com ARCD e CCA foi utilizado 1,1%. A dosagem do SP foi baseada no estudo de Salles (2018) e em testes preliminares. Salles (2018) observou que ao realizar a mistura Controle com 1% de SP, o concreto apresentou elevada trabalhabilidade, sendo o uso reduzido para 0,6%. Neste estudo, ao realizar a mistura Controle com 0,6% do SP, foi obtido uma mistura muito fluida,

que impossibilitou um bom adensamento, sendo adotado o valor 0,3% de SP para o Controle. Como é esperado que a CCA reduza a trabalhabilidade, o percentual de aditivo das misturas com uso da adição e AN foi mantido mais elevado que o Controle, porém menor que as misturas com ARCD. As misturas com 50% e 100% de ARCD foram realizadas com maior quantidade de SP para manter uma trabalhabilidade que possibilitasse um bom adensamento do concreto, conforme indicado por Salles (2018).

As proporções de substituição de agregados e cimento realizadas neste trabalho são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Proporções de substituição realizadas.

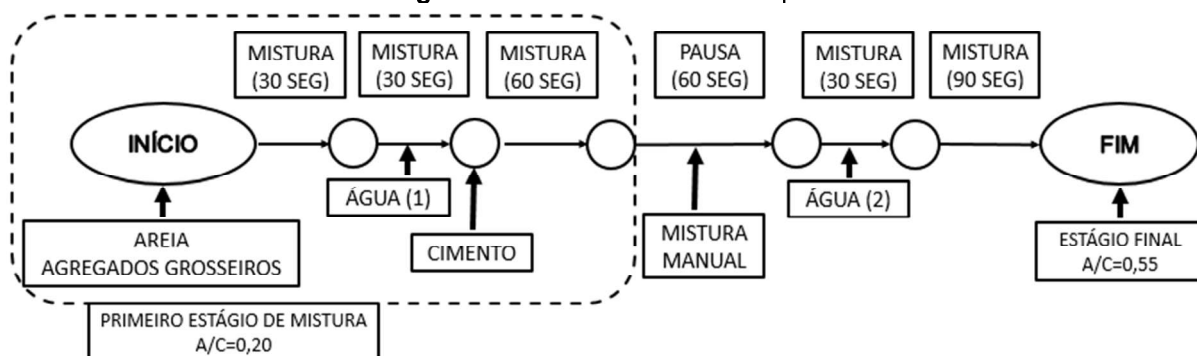
Nome da mistura	%ARDC	%CCA	%SP
Controle	0	0	0,3
CCA10	0	10	0,5
CCA15		15	
CCA20		20	
RCD50	50	0	1,1
RCD50CCA10		10	
RCD50CCA15		15	
RCD50CCA20		20	
RCD100	100	0	1,1
RCD100CCA10		10	
RCD100CCA15		15	
RCD100CCA20		20	

Fonte: a autora.

3.2.2 Confeção do concreto

Para a confecção do concreto, foi escolhido o Método de Mistura Duplo, também chamado de Método de Mistura em Dois Estágios (*Double Mixing Method* ou *Two-Stage Mixing*). Pelo método, os agregados devem ser colocados primeiramente na betoneira e a mistura iniciada. Após 30 segundos, a primeira parte da água de mistura é acrescentada enquanto a mistura continua até um período total de 60 segundos, quando a mistura é interrompida e o cimento é acrescentado junto com a CCA, quando utilizada, e a mistura prossegue por mais 60 segundos. Após os 120 minutos iniciais a mistura é pausada e durante 60 segundos é realizada uma mistura manual. Ao reiniciar a mistura mecânica, o restante da água é adicionado durante 30 segundos, juntamente com o aditivo químico utilizado, e a mistura prossegue por mais 90 segundos. A Figura 6 apresenta o processo do Método de Mistura Dupla.

Figura 6 - Método de Mistura Dupla.



Fonte: Adaptado de Otsuki *et al.* (2003).

A escolha do método foi baseada na pesquisa de Otsuki *et al.* (2003). Esses pesquisadores utilizaram este método para avaliar se a melhoria da zona de transição interfacial (ZTI) relatada por Tazawa *et al.* (1989) em concretos com agregados normais poderia ser alcançada também para os concretos com agregados reciclados. Os autores observaram melhorias na resistência à tração e compressão e redução na profundidade de carbonatação e penetração de íons cloreto.

Tam *et al.* (2005) também utilizaram o Método de Mistura Dupla e relataram que a primeira etapa de mistura, com metade da água necessária, leva à formação de uma fina camada de pasta de cimento na superfície do agregado que irá penetrar na argamassa aderida e preencher as fissuras e vazios existentes. Os autores afirmam que a utilização do Método de Mistura em Dois Estágios proporciona uma ZTI mais forte, aumentando a resistência à compressão.

A mistura do concreto foi realizada no laboratório do CEFET-MG utilizando uma betoneira com capacidade para 400 litros. Os corpos de prova foram moldados em forma cilíndrica, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

3.2.3 Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone

A determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone foi realizada de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998). O molde especificado pela norma foi preenchido por três camadas de concreto, sendo cada camada compactada através de 25 golpes feitos com haste padronizada.

3.2.4 Confeção e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados e curados de acordo com as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2015).

Foram utilizados moldes metálicos para confecção de corpos de prova com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Uma camada de desmoldante Desmol Mix foi aplicada nos moldes para facilitar a retirada e evitar danos os corpos de prova. O desmoldante é composto por óleo vegetal e silicone e foi fornecido pela Alkon Indústria e Comércio Ltda.

O adensamento foi realizado em duas camadas, utilizando mesa vibratória. A desforma foi feita após 24 horas da concretagem. Os corpos de prova foram então levados para um tanque de cura úmida submersa em solução saturada de hidróxido de cálcio, onde ficaram até a data de ensaio.

Para os ensaios mecânicos, os corpos de prova foram retificados utilizando uma retífica do laboratório do CEFET-MG. Este procedimento é realizado para substituir o capeamento.

3.2.5 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), com velocidade de carregamento de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s. Foram utilizados três corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura por ensaio. Os ensaios foram realizados aos 7, 28 e 91 dias no laboratório do CEFET-MG utilizando uma máquina universal de ensaios mecânicos da marca EMIC, que apresenta capacidade de 2000 kN.

3.2.6 Ensaio de módulo estático de elasticidade

O ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão foi realizado de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017). Foram utilizados três corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura por ensaio. Os ensaios foram realizados aos 28 e 91 dias no laboratório do CEFET-MG utilizando extensômetro eletrônico de configuração dupla, modelo EE 08, e uma máquina universal de ensaios mecânicos da marca EMIC.

3.2.7 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011). Foram utilizados três corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura por ensaio. Os ensaios foram realizados aos 28

e 91 dias no laboratório do CEFET-MG utilizando uma máquina universal de ensaios mecânicos da marca EMIC.

O cálculo da resistência à tração é realizado através da equação 1:

$$f_{ct,sup} = \frac{2 F}{\pi d l} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: $f_{ct,sup}$ é a resistência à tração por compressão diametral (MPa); F é a força máxima obtida no ensaio (N); d é o diâmetro do corpo de prova (mm) e l é o comprimento do corpo de prova (mm).

3.2.8 Ensaio de absorção de água por imersão

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009B), utilizando 3 corpos de prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, por ensaio. Os ensaios foram realizados aos 28 e 90 dias.

3.2.9 Ensaio de carbonatação acelerada

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado de acordo com duas normas internacionais (LNEC E 391, 1993 e RILEM CPC-18, 1988), por não possuir normatização brasileira. Os testes foram realizados aos 45 e 90 dias de exposição utilizando corpos de prova cilíndricos.

Após a cura úmida de 28 dias, as amostras passaram por um período de sazonalamento, onde foram mantidas em ambiente fechado e protegido de intempéries por 14 dias antes de serem colocados na câmara de carbonatação. O período de sazonalamento busca garantir equilíbrio da umidade interna dos corpos de prova, tornando a difusão do CO₂ mais uniforme (PAULETTI *et al.*, 2007).

A câmara de carbonatação foi configurada de acordo com as condições de exposição estabelecidas pela E 391 (LNEC, 1993): concentração de dióxido de carbono de $5 \pm 0,1\%$, umidade relativa de $65 \pm 5\%$ e temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Após o período de exposição, 3 amostras foram avaliadas de acordo com as especificações da CPC-18 (RILEM, 1988). Os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral e a solução de fenolftaleína foi aplicada para marcação da região carbonatada. A profundidade de carbonatação foi medida em 6 pontos de cada amostra para fazer a média.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AGREGADO MIÚDO

A quantidade de material retido em cada peneira após a agitação mecânica é apresentada na Tabela 6.

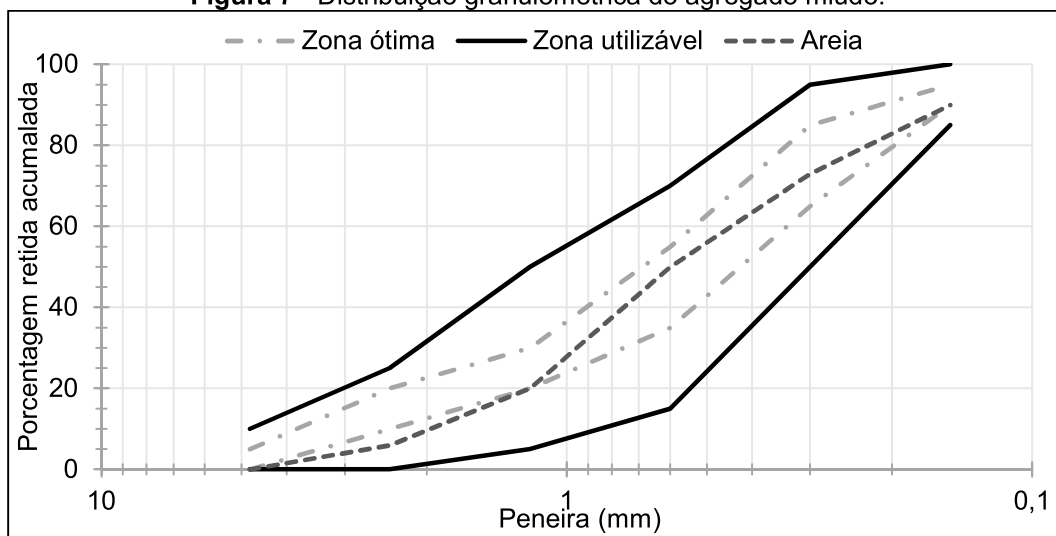
Tabela 6 - Resultados do ensaio de peneiramento do agregado miúdo.

Peneira (mm)	Areia retida acumulada (%)
4,75	0
2,4	6
1,2	20
0,6	50
0,3	73
0,15	90
Fundo	100

Fonte: a autora.

A curva granulométrica está representada na Figura 7 e demonstra que os valores obtidos estão dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009A).

Figura 7 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.



O módulo de finura obtido para a areia foi de 2,4 e está dentro da zona ótima, que varia entre 2,20 e 2,90 de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009A). As demais propriedades físicas avaliadas são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades físicas do agregado miúdo.

Propriedade física	Valor
Massa específica (kg/m ³)	2570
Massa unitária (kg/m ³)	1446
Índice de vazios (%)	43,5

Fonte: a autora.

4.2 AGREGADO GRAÚDO

A quantidade de material retido em cada peneira após a agitação mecânica é apresentada na Tabela 8.

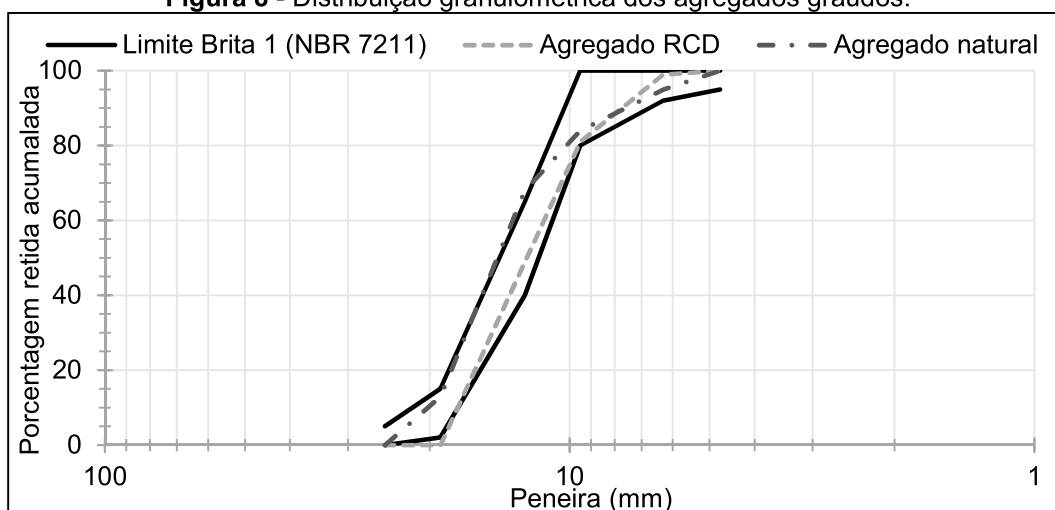
Tabela 8 - Resultado do ensaio de peneiramento dos agregados graúdos.

Peneira (mm)	Agregado natural retido acumulado (%)	Agregado de RCD retido acumulado (%)
25	0	0
19	13	1
12,5	68	48
9,5	84	81
6,3	95	99
4,75	100	100

Fonte: a autora.

As curvas de distribuição granulométrica dos agregados graúdos estão representadas na Figura 8 e demonstram que os valores obtidos estão dentro dos limites para a classificação da brita 1, estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009A).

Figura 8 - Distribuição granulométrica dos agregados graúdos.



Fonte: a autora.

Os resultados obtidos para as demais propriedades físicas avaliadas nos agregados graúdos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades físicas dos agregados graúdos.

Propriedade física	Agregado natural	Agregado RCD
d - massa específica do agregado seco (g/cm^3)	2,65	2,57
d_s - massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm^3)	2,64	2,26
d_a - massa específica aparente (g/cm^3)	2,63	2,07
A - absorção de água (%)	0,37	9,32
ρ_{as} - massa unitária (g/cm^3)	1,56	1,17
Ev - Índice de volume de vazios (%)	40,22	43,19
Perda por abrasão (%)	15,96	47,60

Fonte: a autora.

Conforme apresentado na Tabela 9, o agregado natural apresenta massa específica maior que o agregado de resíduo de construção e demolição, sendo a maior diferença de 27% encontrada para a massa específica aparente. O ARCD também apresentou maiores valores de absorção de água, sendo 25 vezes mais elevada que o AN.

A massa unitária do AN foi 33% maior que do ARCD. O índice de vazios do ARCD foi 7% maior que valor obtido para o AN.

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do ARCD apresentaram valores equivalentes aos obtidos por Salles (2018), que utilizou agregados reciclados provenientes da mesma usina de reciclagem.

A **Figura 9** apresenta os agregados após a realização do ensaio de abrasão “Los Angeles”, onde o ARCD apresentou perda por abrasão três vezes maior que o AN. Apesar do ARCD ter apresentado um valor elevado de perda por abrasão, o valor obtido está em conformidade com o limite de desgaste de 50% estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2009A).

Figura 9 - Abrasão Los Angeles.



Fonte: a autora.

4.3 CIMENTO E CCA

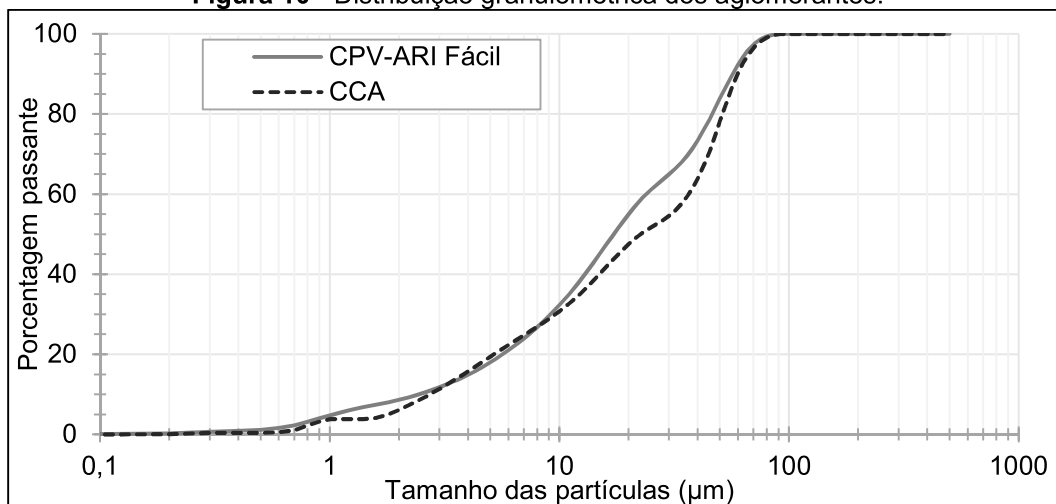
A densidade e a área superficial, obtidas por picnometria com gás hélio e adsorção de nitrogênio, respectivamente, estão apresentadas na Tabela 10. Os valores obtidos nos ensaios mostram que a CCA possui maior área superficial e menor massa específica que o cimento. A elevada área superficial da CCA é devido à sua estrutura de poros (XU *et al.*, 2012).

Tabela 10 - Propriedades físicas dos aglomerantes.

Propriedade física	Cimento	CCA
Massa específica (g/cm ³)	3,058	2,203
Área superficial (BET)	1,374	12,305

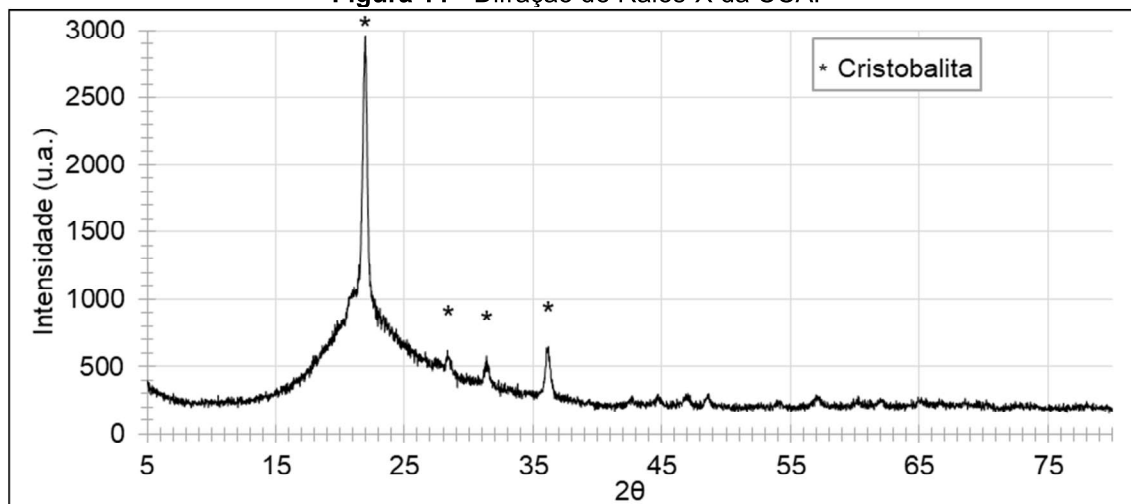
Fonte: a autora.

As curvas de distribuição granulométrica da CCA e do cimento são apresentadas na Figura 10. É possível observar que a granulometria dos materiais está entre 0,1 μm e 100 μm e são próximas. O diâmetro médio das partículas obtido no ensaio foi de 24,82 μm e 28,54 μm para o cimento e a CCA, respectivamente.

Figura 10 - Distribuição granulométrica dos aglomerantes.

Fonte: a autora.

Através do difratograma de raios X, apresentado na Figura 11, é possível perceber um pico definido que caracteriza a presença de cristobalita, uma fase cristalina da sílica, e também apresenta a fase amorfa, responsável pela reatividade da cinza e caracterizada pela maior intensidade medida entre os ângulos de 20° e 30° (CORDEIRO *et al.*, 2011).

Figura 11 - Difração de Raios-X da CCA.

Fonte: a autora.

A composição química, determinada através do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raio-X (FRX), é apresentada na Tabela 11. Collatto *et al.* (2011) e Batista (2016) obtiveram teores de SiO_2 semelhantes ao estudar a CCA de mesma origem. A composição da CCA apresenta $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ acima de 95%, satisfazendo o requisito mínimo de 70% estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014) para materiais pozolânicos.

Tabela 11 - Composição química da CCA.

Componente	Teor (%)
SiO_2	93,583
K_2O	2,679
Al_2O_3	1,87
CaO	0,766
MnO	0,509
P_2O_5	0,467
Fe_2O_3	0,094
CuO	0,012
Rb_2O	0,011
ZnO	0,009

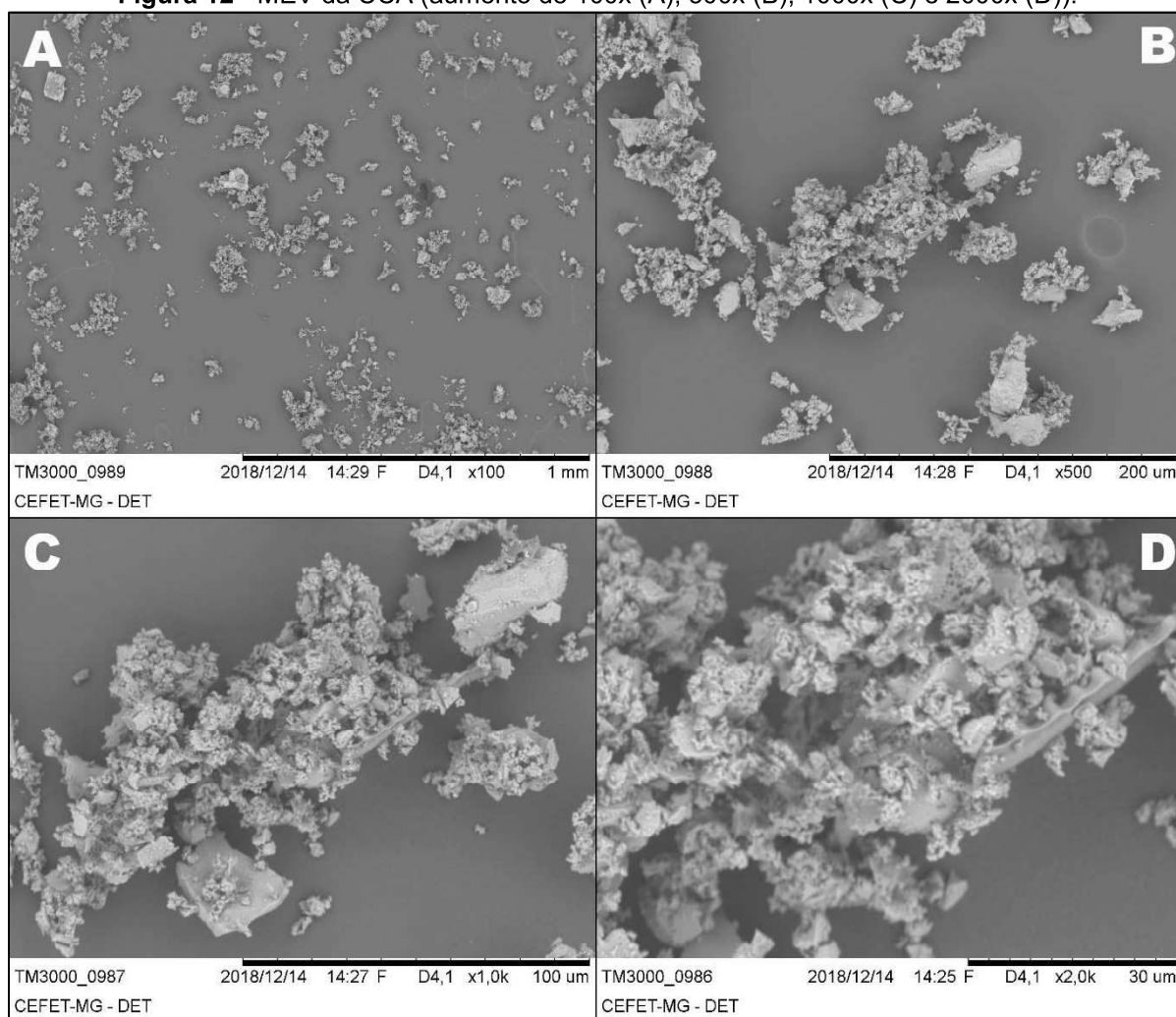
Fonte: a autora.

O ensaio de perda ao fogo indicou uma redução de 11% na massa da amostra ensaiada, ultrapassando o requisito de 10% estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014). Valores considerados elevados de perda por ignição também foram obtidos nos estudos de Cordeiro *et al.* (2008), sendo atribuído à presença de carbono residual.

Os valores de fixação de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), obtidos por meio do ensaio de Chapelle Modificado, foi de 456 $\text{mg}_{\text{Ca(OH)}_2}/\text{g}_{\text{CCA}}$. De acordo com Raverdy *et al.* (1980, *apud* Cordeiro, 2006, p. 253), o material apresenta valor superior ao mínimo de 330 $\text{mg}_{\text{Ca(OH)}_2}/\text{g}_{\text{Pozolana}}$ para ser considerado um material pozolânico. Utilizando CCA proveniente da mesma fonte Batista (2016) também obteve índice de 763 $\text{mg}_{\text{Ca(OH)}_2}/\text{g}_{\text{CCA}}$.

Para avaliar a estrutura celular e a geometria da CCA foi utilizada a Microscopia Eletrônica de Varredura. A **Figura 12** apresenta as imagens com diferentes aumentos. É possível observar que a CCA utilizada apresenta forma angular e estrutura porosa. Resultados semelhantes também foram observados por Van Tuan *et al.* (2011) e Chindaprasirt e Rukzon (2008).

Figura 12 - MEV da CCA (aumento de 100x (A), 500x (B), 1000x (C) e 2000x (D)).

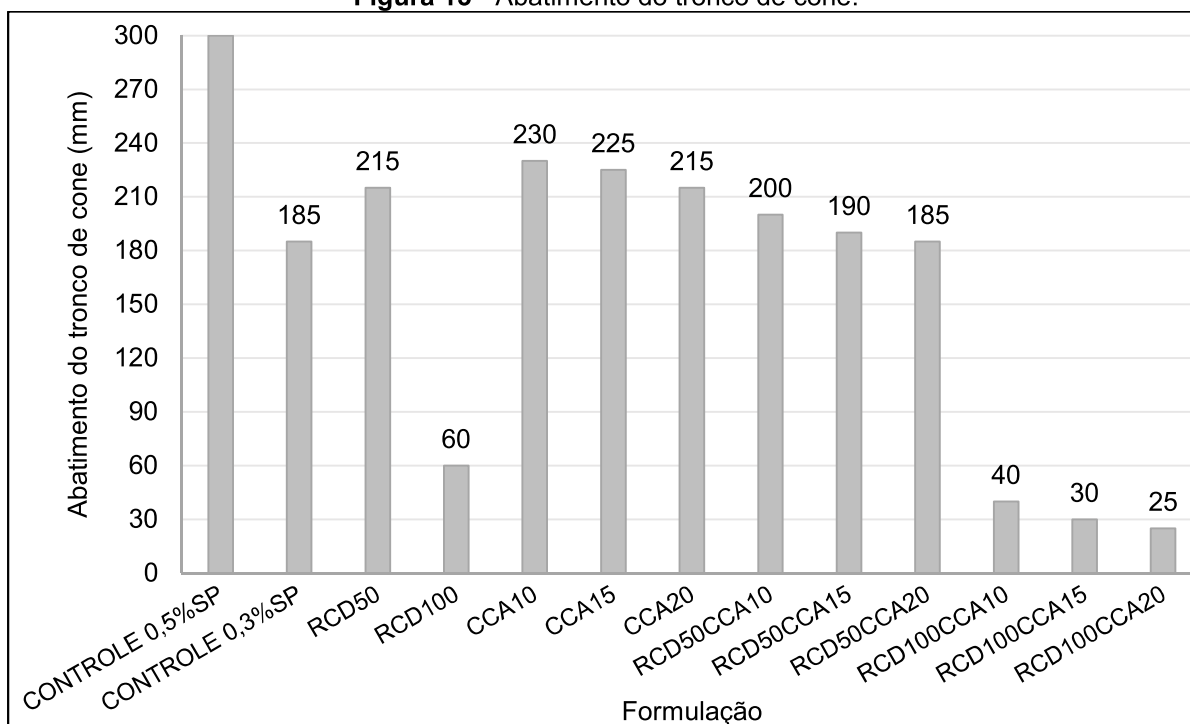


Fonte: a autora.

4.4 TRABALHABILIDADE DO CONCRETO

Os resultados do abatimento do tronco de cone medido para as misturas de concreto são apresentados na Figura 13. A trabalhabilidade das misturas foi mais afetada pela quantidade de ARCD da mistura do que pela proporção de CCA utilizada.

A partir do resultado do abatimento para a mistura Controle com 0,5% de SP é possível perceber que as misturas com incorporação de ARCD e/ou CCA apresentam redução significativa na trabalhabilidade do concreto. Enquanto o abatimento máximo para as misturas com incorporação foi de 230 mm, a mistura Controle com 0,5% de SP se apresentou muito fluida, desmoronando durante o ensaio.

Figura 13 - Abatimento do tronco de cone.

Fonte: a autora.

Ao utilizar 100% de ARCD (RCD100) na mistura, ocorreu uma redução de 73% na trabalhabilidade em comparação à mistura com 50% de substituição do AN (RCD50) e mesmo teor de SP. A perda de trabalhabilidade das misturas com ARCD está relacionada à maior capacidade de absorção de água do ARCD (9,32%) em comparação ao AN (0,37%).

O aumento do teor de CCA na mistura também resultou em uma pequena perda de trabalhabilidade. Ao aumentar a incorporação de 10% para 15%, a perda foi de aproximadamente 2,2%. Quando substituído o teor de 20% de CCA na mistura, a perda na trabalhabilidade foi de 6,5% com relação à mistura com 10% de substituição do cimento. A estrutura porosa e a área superficial da CCA absorve água da mistura, provocando redução na trabalhabilidade da mistura (XU *et al.*, 2012).

Ao utilizar somente ARCD nas misturas, o efeito do aumento do teor de CCA na trabalhabilidade foi mais significativo. A mistura RCD100CCA10 apresentou redução de 33,3% na trabalhabilidade do concreto comparado à mistura RCD100. Ao comparar a mistura RCD100CCA20, a perda passa para 58,3%.

Estudos anteriores também relataram redução da trabalhabilidade do concreto com o aumento da incorporação de ARCD e/ou CCA. Adnan *et al.* (2010) relataram 59,5% de redução na mistura com 100% de ARCD e 12% de CCA em relação à mistura sem substituições. Padhi *et al.* (2018) observaram reduções de 16% e 30%

na trabalhabilidade das misturas com 100% de ARCD combinado com 10% e 20% de CCA, respectivamente. Os autores atribuem as reduções de trabalhabilidade à maior capacidade de absorção de água do ARCD e da CCA.

4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DO CONCRETO

Os resultados de resistência à compressão axial do concreto para as três idades avaliadas (7, 28 e 91 dias) estão apresentados na Figura 14.

Aos 7 dias, todas as misturas já apresentaram resultados acima de 30 MPa, sendo o rápido ganho de resistência atribuído ao uso do cimento CPV-ARI. As misturas que mais se aproximaram da resistência do concreto Controle foram RCD100 e RCD100CCA10. Esse melhor desempenho em idade inicial da mistura com 100% de ARCD quando comparado à mistura com 50% de ARCD está relacionado à redução do fator a/c efetivo provocada pela alta capacidade de absorção do ARCD.

A menor resistência à compressão aos 7 dias apresentada pelas misturas contendo CCA pode ser atribuída ao maior tempo necessário para que ocorram as reações pozolânicas. Como parte do cimento foi substituída, ocorrem menos reações nessa primeira idade.

Aos 28 e 91 dias, misturas RCD50 e RCD100 apresentaram resistência próxima. Ao comparar as duas misturas com a Controle, as misturas contendo ARCD apresentaram redução na resistência de 13,8 e 14,5% aos 28 dias, e 11,7 e 13% aos 91 dias, para as misturas RCD50 e RCD100 respectivamente. Essa redução na resistência à compressão ocorre devido à menor qualidade do ARCD em comparação ao AN.

As misturas contendo CCA apresentaram ganho significativo de resistência de 7 para 91 dias. Os percentuais de aumento da resistência desse período foram de 37,4%, 35,7% e 44,9% para as misturas CCA10, CCA15 e CCA20, respectivamente. Com relação à mistura Controle, as três misturas contendo CCA apresentaram, dentro do desvio padrão, resistência equivalente aos 91 dias. Esses resultados demonstram que a CCA, nas proporções avaliadas neste estudo, pode ser utilizada para reduzir o uso de cimento em concretos sem perdas na resistência à compressão. A **Figura 15** apresenta as curvas de resistência à compressão em função do teor de CCA para as misturas fabricadas utilizando AN nas três idades avaliadas.

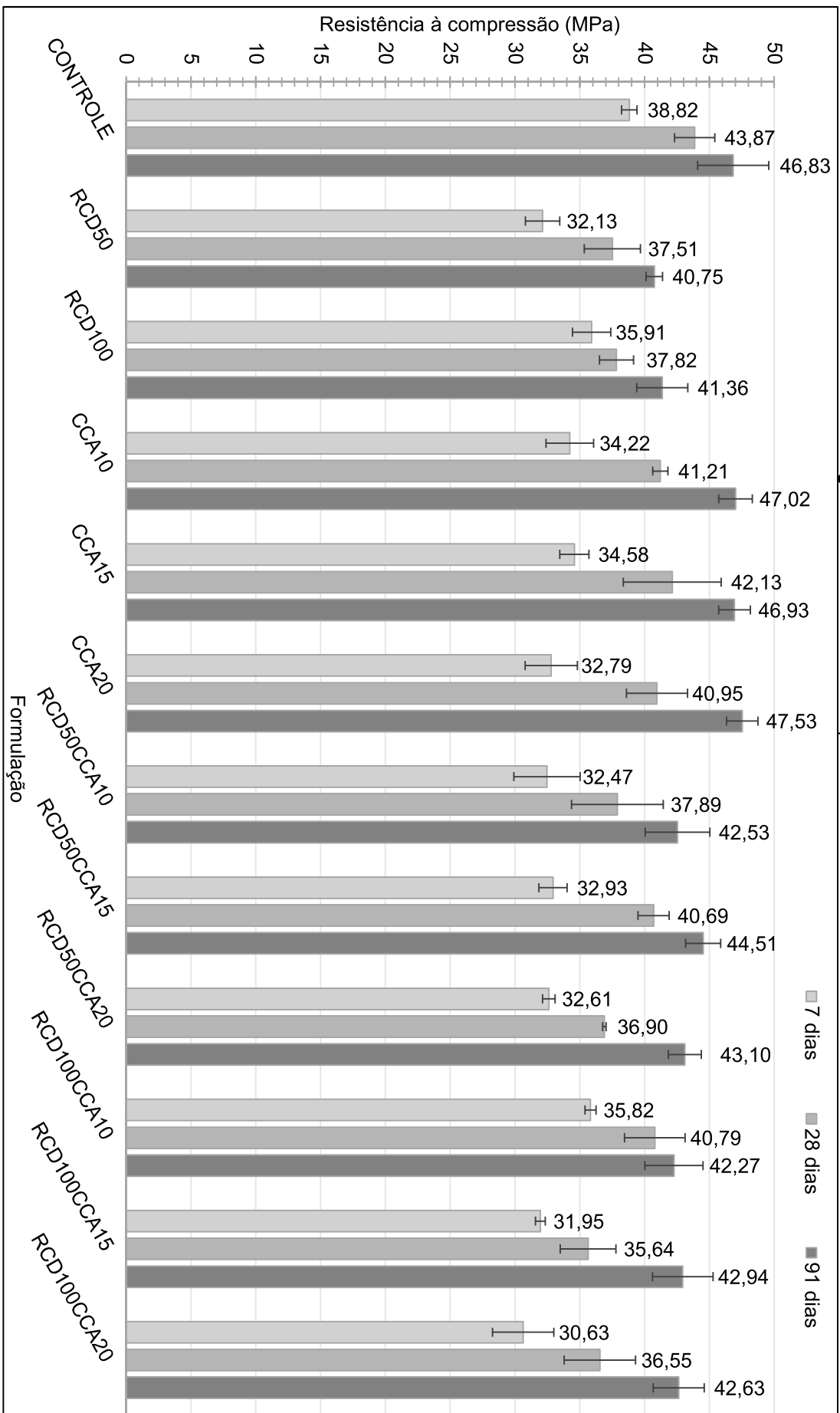
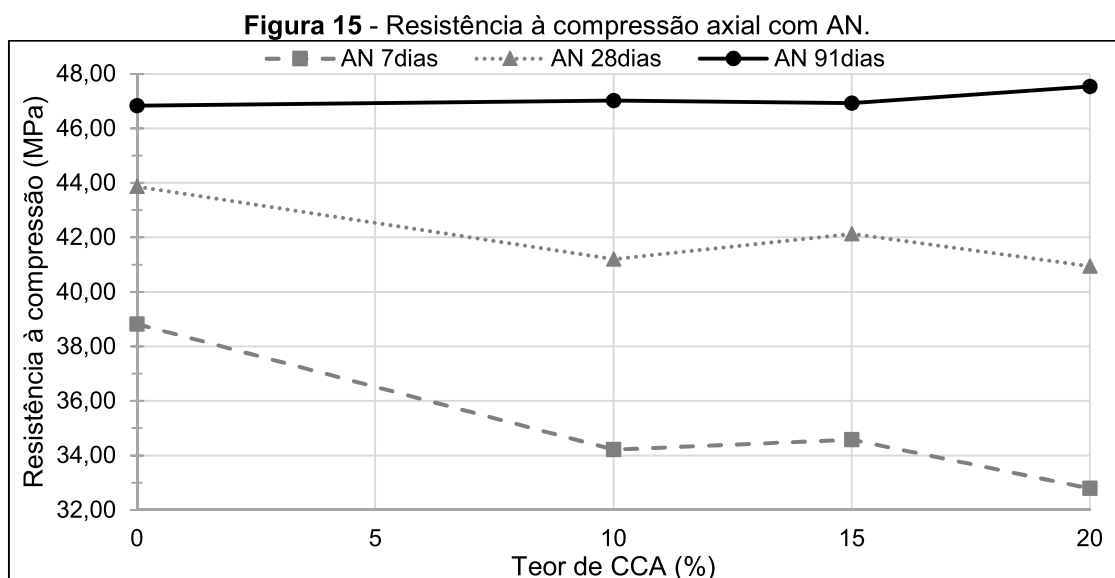


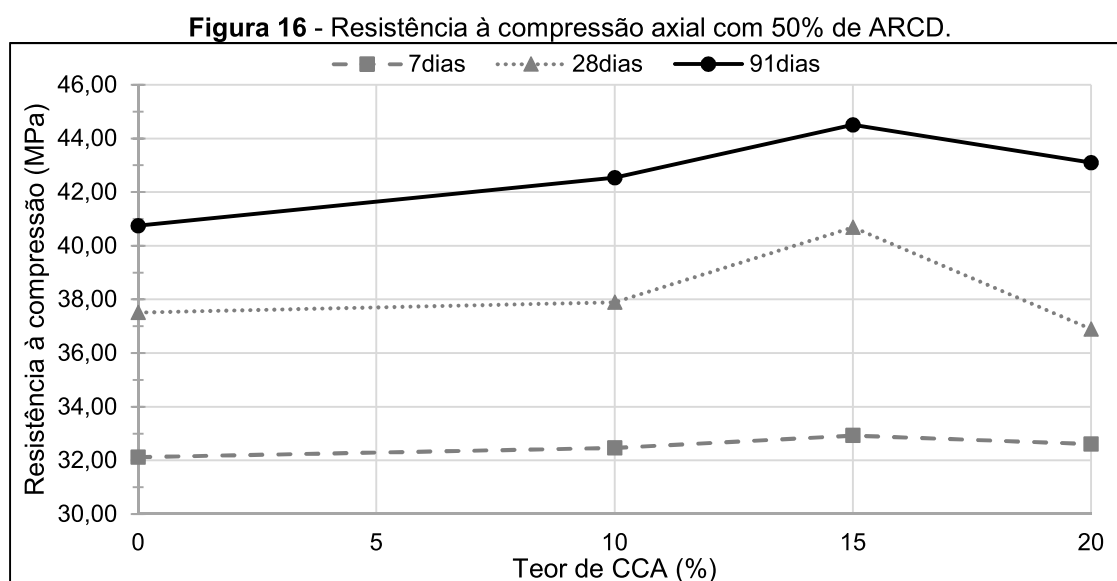
Figura 14 - Resistência à compressão axial do concreto.

Fonte: a autora.



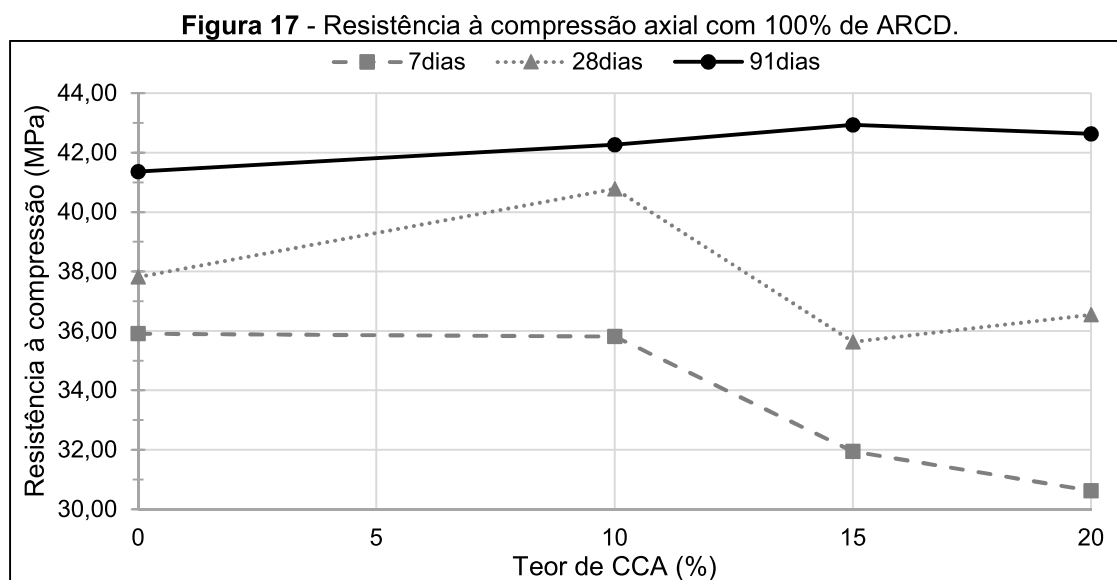
Fonte: a autora.

A incorporação da CCA nas misturas contendo ARCD mostrou melhoria nos resultados. Aos 28 dias as misturas já apresentavam resistência equivalente à mistura com ARCD e sem uso de CCA. Aos 91 dias todas as misturas confeccionadas com a combinação de ARCD e CCA apresentaram melhor desempenho que a mistura com ARCD e sem adição de CCA. O acréscimo de resistência das misturas com ARCD e CCA ficou entre 2,2% e 9,2% quando comparado à mistura com mesmo percentual de ARCD e sem adição de CCA. A mistura com uso de ARCD e CCA que apresentou maior resistência foi a RCD50CCA15, com resistência de 44,51 MPa, sendo este resultado 9,2% superior à mistura RCD50 e 5% menor que a mistura Controle. A **Figura 16** apresenta as curvas de resistência à compressão em função do teor de CCA para as misturas fabricadas utilizando 50% de ARCD.



Fonte: a autora.

Considerando as misturas com 100% de ARCD e incorporação de CCA, a mistura com 15% da adição mineral apresentou a maior resistência à compressão, 42,94 MPa, sendo este resultado 3,8% maior que a mistura RCD100 e 8,3% menor que a mistura Controle. A Figura 24 apresenta as curvas de resistência à compressão em função do teor de CCA para as misturas fabricadas utilizando 100% de ARCD.



Fonte: a autora.

A melhoria da resistência do concreto com a totalidade de agregados graúdos reciclados alcançada com a incorporação da CCA observada neste estudo também foi obtida na pesquisa de Prameetthaa *et al.* (2015), onde os pesquisadores utilizaram 8% de CCA e fabricaram concreto com resistência à compressão equivalente à referência e 10,65% superior à mistura sem uso da CCA. Esses resultados mostram que a reação pozolânica da CCA proporcionou equiparação do concreto com AN e ARCD. A sílica presente na CCA reage com o hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento, formando um gel C-S-H adicional que preenche os poros existentes no agregado reciclado conferindo maior resistência (PRAMEETTHAA *et al.*, 2015).

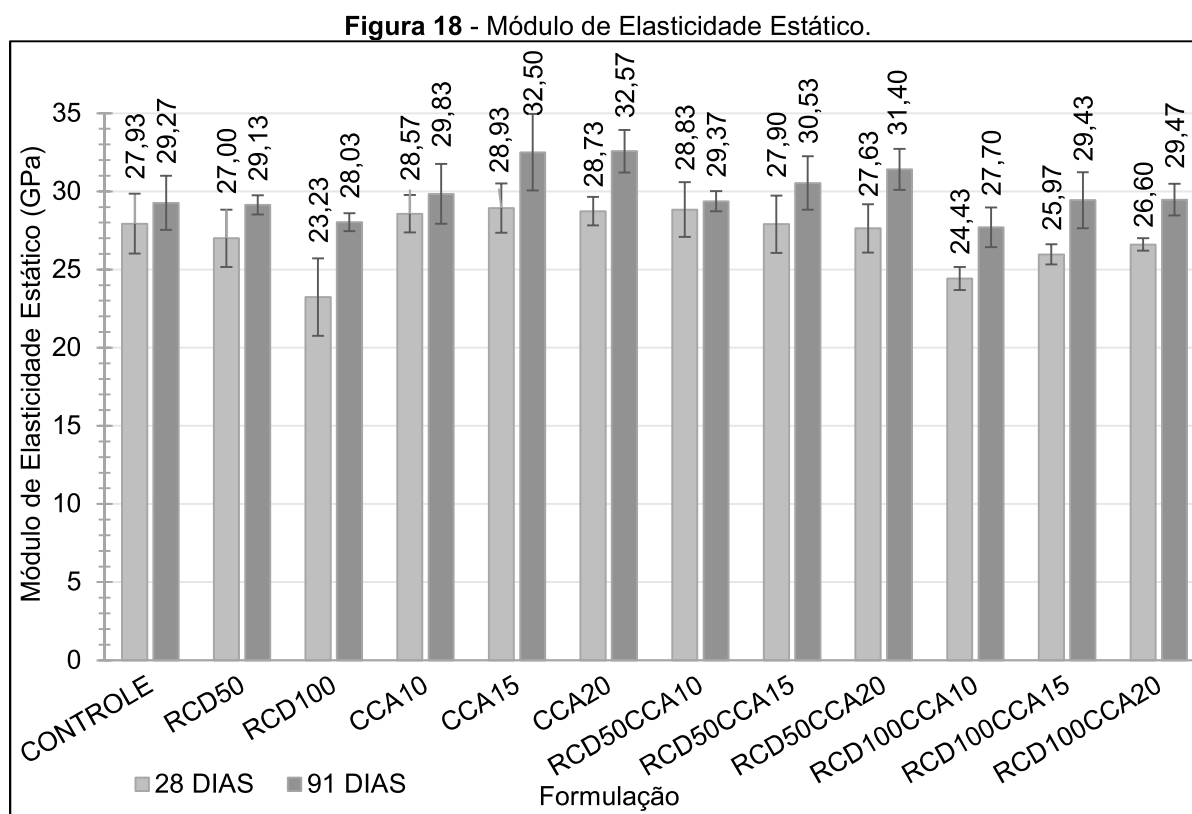
Utilizando 100% de agregados graúdos reciclados e 35% de CCA, Tangchirapat *et al.* (2008) confeccionaram concreto com resistência à compressão equivalente à mistura de referência e superior à mistura sem uso da CCA. Com 20% de CCA, a resistência obtida pelos pesquisadores foi mais elevada que a mistura referência e que a mistura utilizando somente ARCD.

A. Jindal e Ransinchung (2018) utilizaram 30% de ARCD para fabricação de concretos com 5%, 10% e 15% de CCA e observaram que as três misturas utilizando

CCA apresentaram resistência à compressão superior à mistura com ARCD sem a adição mineral. Os autores atribuem o aumento da resistência às reações pozolânicas e à redução do fator a/c. A área superficial da matriz é maior com o uso da CCA, melhorando a ligação entre os agregados e proporcionando maior resistência às misturas (A. JINDAL e RANSINCHUNG, 2018).

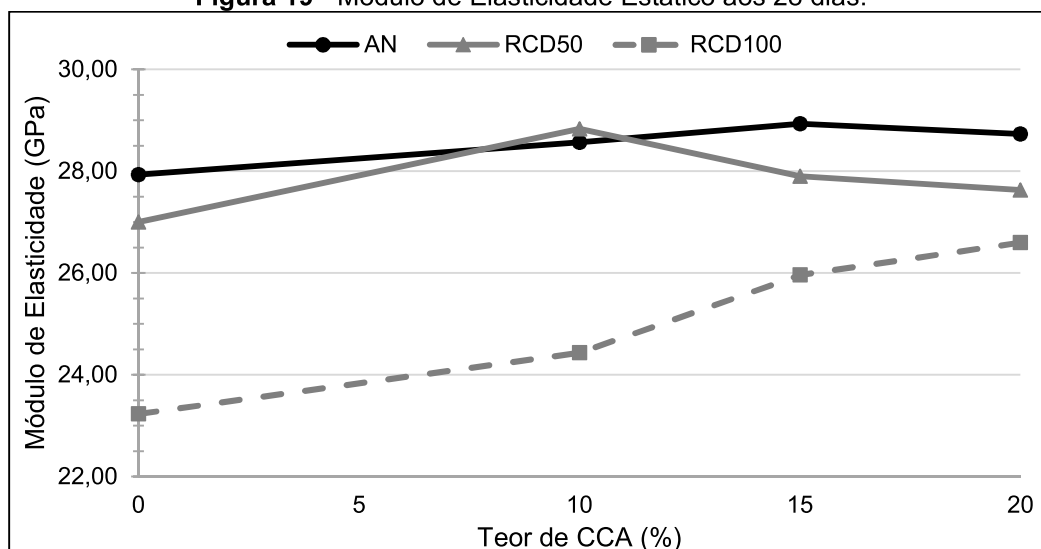
4.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático do concreto estão apresentados na Figura 18. Todas as misturas apresentaram acréscimo no valor do módulo de 28 para 91 dias.



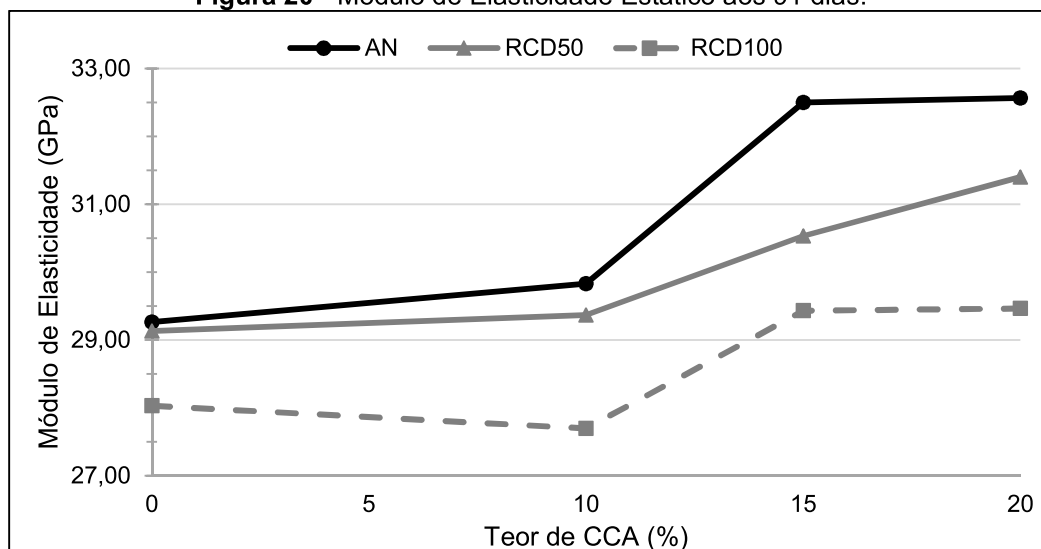
Fonte: a autora.

A partir dos resultados, percebe-se que aos 28 dias o teor de ARCD da mistura influenciou negativamente os resultados do módulo de elasticidade. As misturas RCD50 e RCD100 apresentaram resultados 3,3% e 16,8% menores que a mistura Controle. As misturas RCD100CCA10, RCD100CCA15 e RCD100CCA20 apresentaram redução no módulo entre 4,8% e 12,5% em comparação à mistura Controle. As demais misturas apresentaram resultados equivalentes à Controle. As curvas de evolução do módulo de elasticidade aos 28 dias em função do aumento do teor de CCA nas misturas são apresentadas na **Figura 19**.

Figura 19 - Módulo de Elasticidade Estático aos 28 dias.

Fonte: a autora.

Aos 91 dias, apenas as misturas RCD100 e RCD100CCA10 apresentaram valores menores que a mistura Controle, sendo as reduções de 4,2% e 5,4%, respectivamente. As demais misturas apresentaram valores iguais ou superiores à mistura Controle, sendo o maior acréscimo observado nas misturas CCA15 e CCA20, com 11%. A **Figura 20** apresenta as curvas de evolução do módulo aos 91 dias em função do teor de CCA nas misturas.

Figura 20 - Módulo de Elasticidade Estático aos 91 dias.

Fonte: a autora.

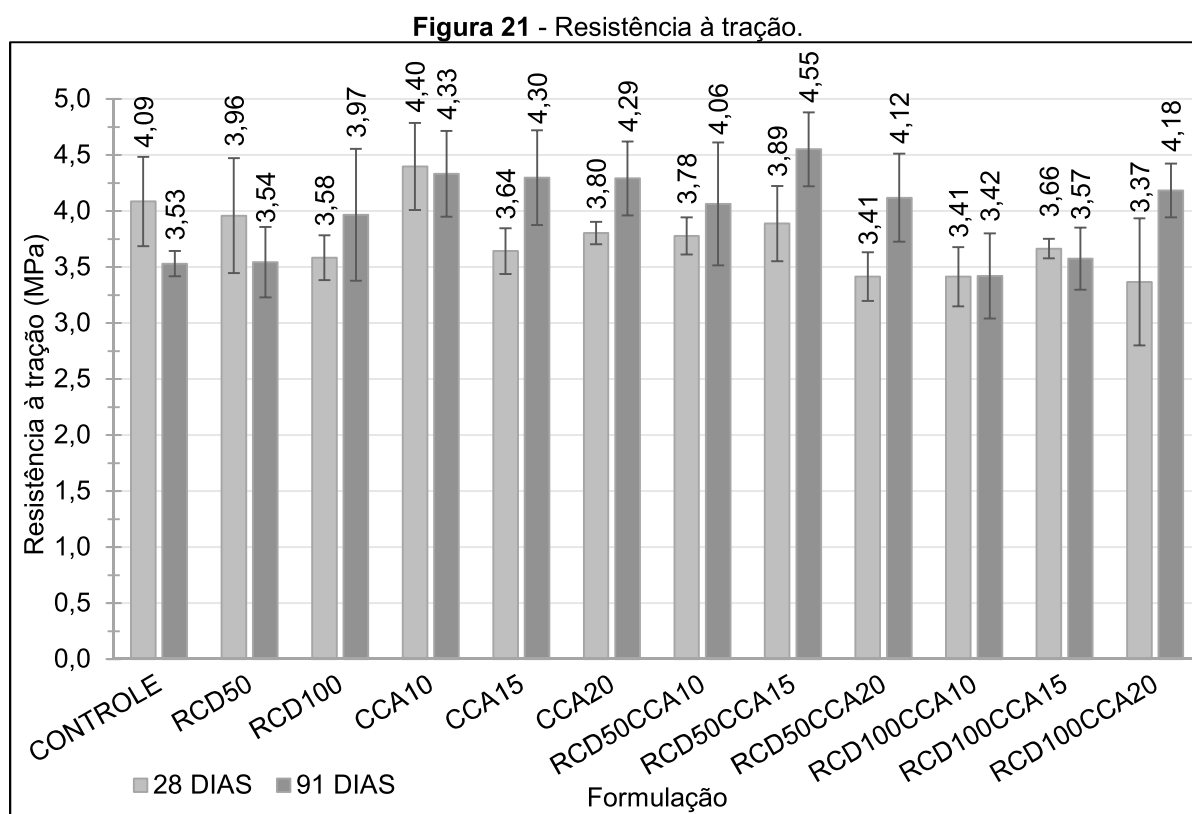
Todas as misturas contendo CCA e ARCD apresentaram valores de módulo equivalente ou superior, considerando-se o desvio padrão, que a respectiva mistura com ARCD e sem uso da CCA. Esses resultados indicam que a CCA foi capaz de melhorar a microestrutura do concreto com ARCD, fortalecendo a ZTI das misturas.

Os resultados demonstraram que o uso de 15% e 20% de CCA foram as proporções mais eficientes com relação ao módulo de elasticidade estático, mesmo para as misturas com substituição do ARCD.

A redução do módulo de elasticidade das misturas com 100% de ARCD e CCA em relação à mistura Controle, para testes realizados aos 28 dias, também foi observada nos estudos de Tangchirapat *et al.* (2008), Prameetthaa (2015) e Padhi *et al.* (2018). A redução do módulo de elasticidade com uso do ARCD é atribuída ao menor módulo de elasticidade do ARCD quando comparado ao AN. Nenhum desses estudos realizou testes em idades mais avançadas.

4.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral do concreto estão apresentados na Figura 21. Os resultados do ensaio indicam uma redução da resistência à tração com o uso de ARCD e acréscimo com a incorporação da CCA nas misturas.

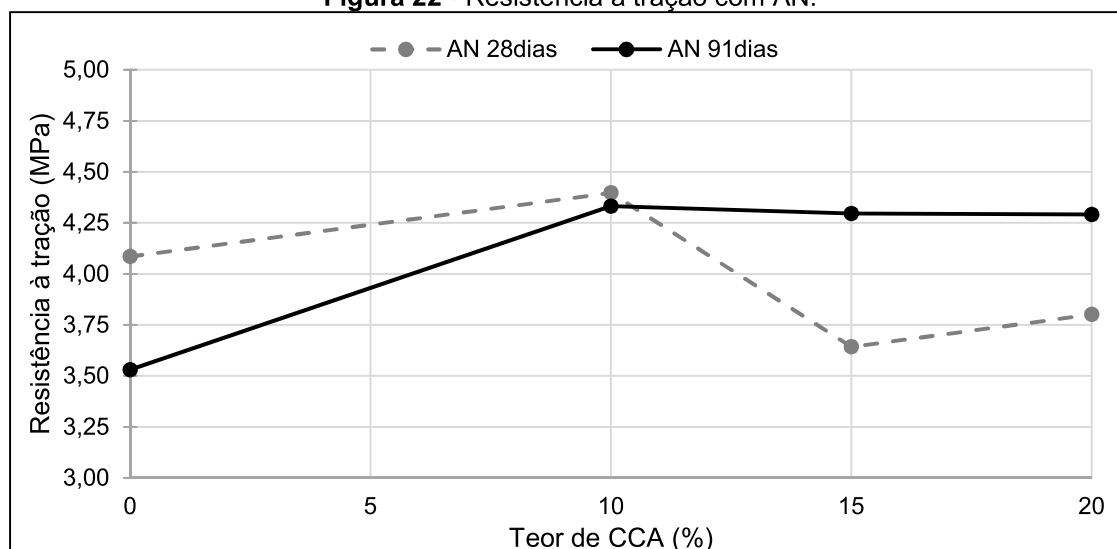


Fonte: a autora.

A **Figura 22** apresenta as curvas de tração em função do teor de CCA nas misturas contendo apenas AN aos 28 e 91 dias. Observa-se que as misturas com CCA

apresentaram ganho de resistência dos 28 aos 91 dias e obtiveram valores maiores que a mistura Controle.

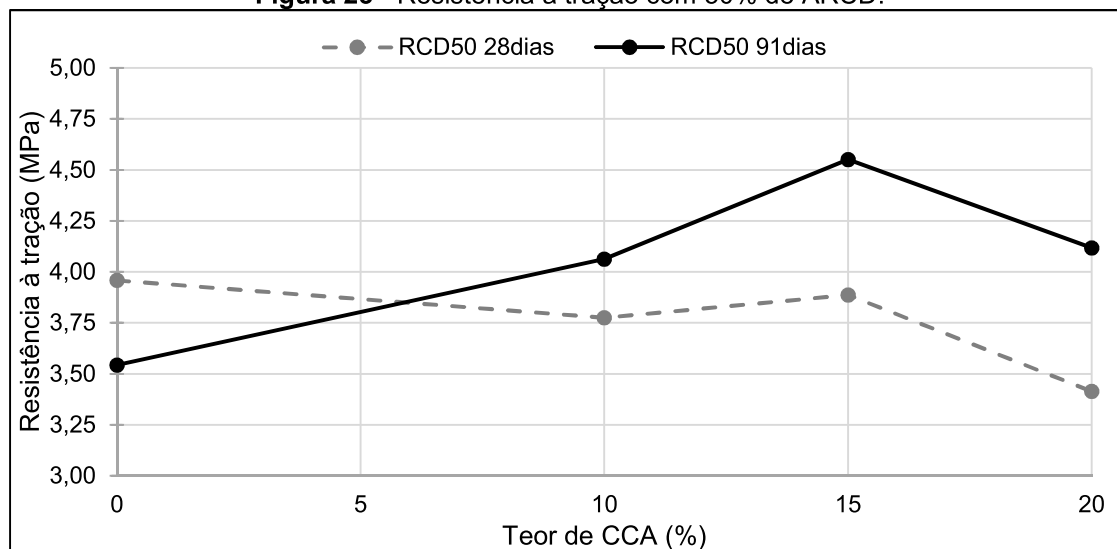
Figura 22 - Resistência à tração com AN.



Fonte: a autora.

A **Figura 23** apresenta as curvas de resistência à tração em função do teor de CCA. É possível observar o efeito pozolânico da adição mineral que confere maior resistência à tração de 28 dias para 91 dias. O melhor desempenho foi observado na mistura RCD50CCA15, que apresentou acréscimo de 11,2% em relação à mistura Controle e 28,5% em relação à mistura RCD50.

Figura 23 - Resistência à tração com 50% de ARCD.



Fonte: a autora.

Tangchirapat *et al.* (2008) relataram valores de resistência à tração ligeiramente menor para as misturas contendo CCA e ARCD que a resistência obtida para a mistura utilizando AN. As reduções observadas nos testes aos 28 dias foram entre 13,7% e 15,5% com relação à mistura controle.

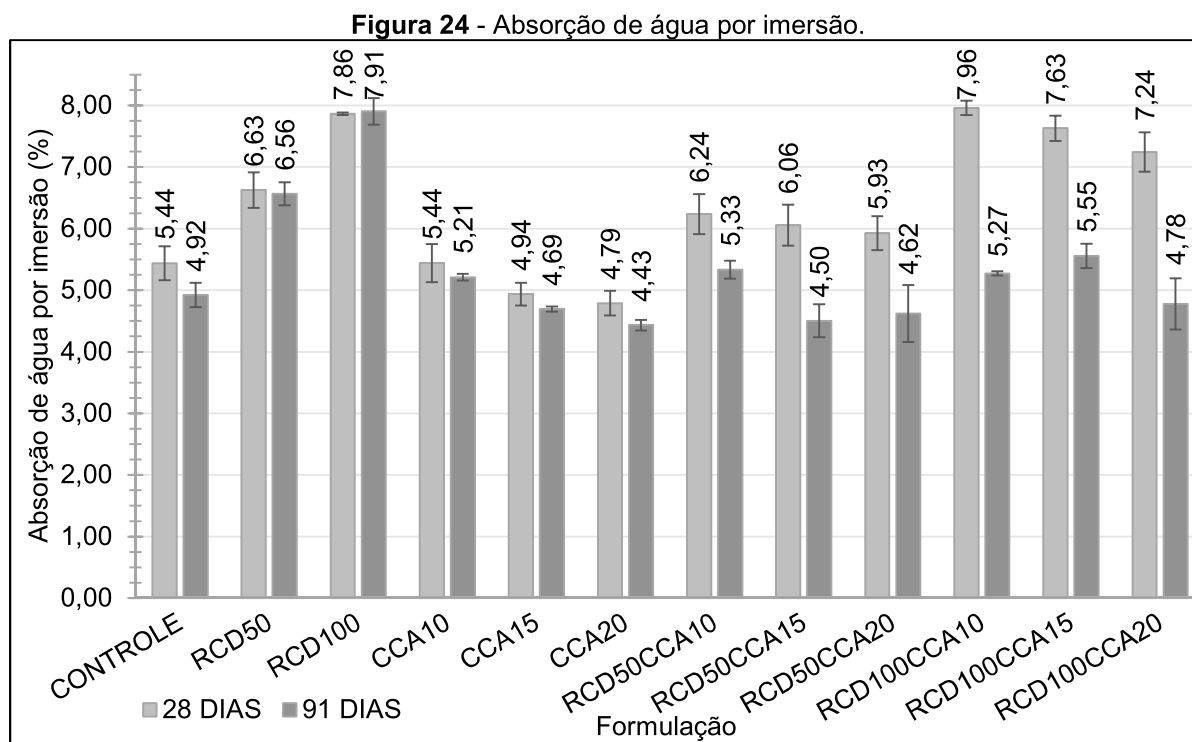
Prameetthaa *et al.* (2015) observaram que as misturas contendo ARCD apresentaram menor resistência à tração que a mistura controle e que a incorporação da CCA nas misturas foi capaz de reduzir essas perdas. A melhoria do desempenho é atribuída à melhoria da ZTI proporcionada pelo C-S-H produzido pelas reações pozolânicas da CCA.

Padhi *et al.* (2018) observaram decréscimo na resistência à tração ao substituir os agregados naturais pelos reciclados e também ao aumentar o percentual de CCA utilizada nas misturas realizadas. Os autores relatam que a utilização da CCA em quantidades acima de 20% resultou em degradação elevada da resistência à tração. As perdas são atribuídas à qualidade inferior do ARCD e à formação de uma ZTI mais fraca que a formada com uso de agregados naturais.

A. Jindal e Ransinchung (2018) relataram que a resistência à tração foi significativamente maior para as misturas contendo a adição mineral quando comparado à mistura feita apenas com o agregado reciclado, o acréscimo observado foi entre 9% e 24%.

4.8 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

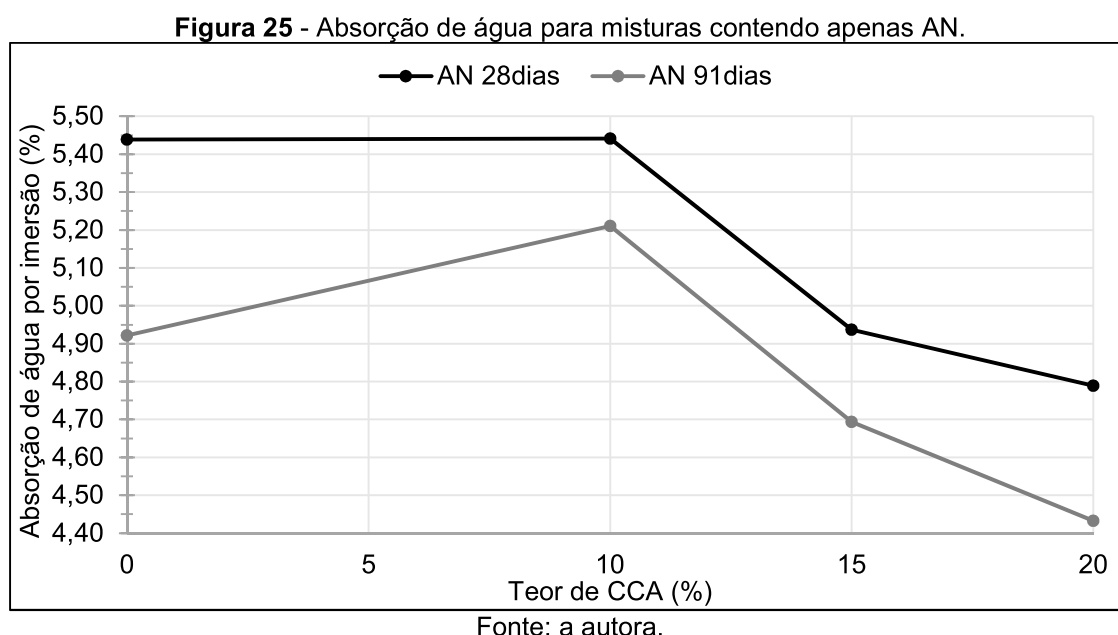
Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão para todas as misturas de concreto estão apresentados na Figura 24.



Fonte: a autora.

As misturas RCD50 e RCD100 apresentaram valores mais elevados de absorção, 6,6% e 7,9% respectivamente, e não houve diferença nos testes de 28 dias para 91 dias. Isso indica que os poros das misturas e a conexão entre eles não foram modificados com o aumento do período de cura. A maior porosidade e capacidade de absorção do ARCD fazem com que o concreto confeccionado com esse tipo de agregado apresente maior absorção que a mistura que contém apenas AN.

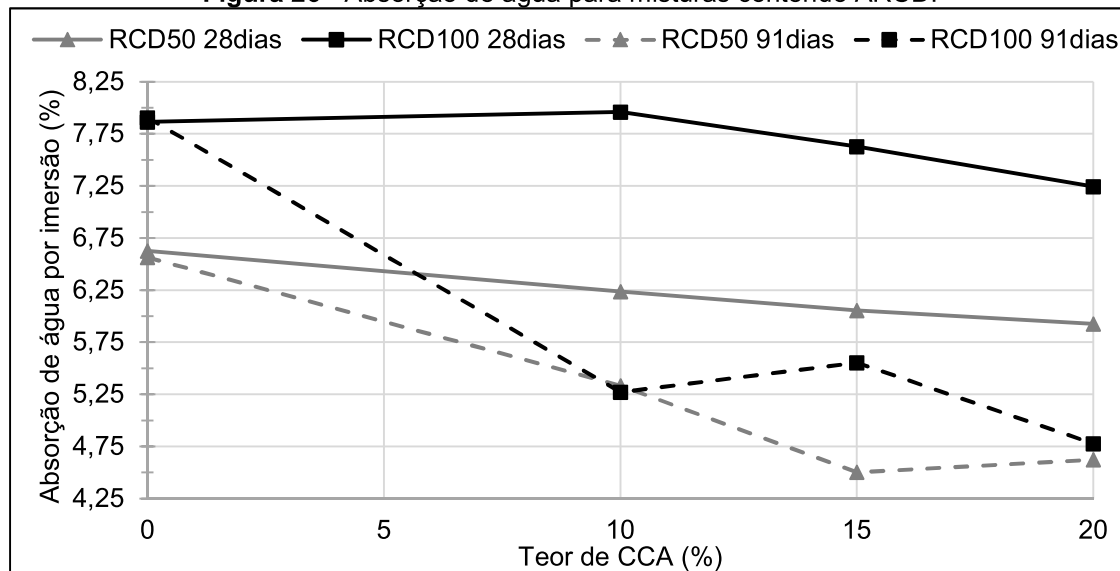
As misturas CCA10, CCA15 e CCA20 apresentaram redução de absorção entre 4,2% e 7,4% nos testes de 28 para 91 dias. Em comparação com a mistura Controle, as três misturas apresentaram, dentro da margem de desvio do ensaio, resultados de absorção equivalentes ou inferiores. A menor capacidade de absorção dessas misturas contendo CCA indica melhoramento da microestrutura, que pode ser atribuído às reações pozolânicas que ocorrem nas misturas que utilizam a adição. As curvas de evolução da capacidade de absorção de água para as misturas contendo apenas AN em função do teor de CCA utilizado na mistura estão apresentadas na Figura 25.



A combinação do uso de ARCD com a CCA nas misturas proporcionou melhorias nos resultados de absorção de água. Aos 28 dias foi possível perceber reduções de até 10,6% comparando as misturas com ARCD e CCA à mistura com o respectivo teor de ARCD e sem a adição mineral. Aos 91 dias, todas as misturas com CCA e ARCD apresentaram resultados significativamente menores que as misturas RCD50 e RCD100, com reduções entre 18,8% e 39,6%. A **Figura 26** apresenta as curvas de evolução da absorção de água para as misturas contendo ARCD em função do teor

de CCA utilizado. Em relação à mistura Controle, as misturas RCD50CCA15, RCD50CCA20 e RCD100CCA20 apresentaram redução entre 2,9% e 8,5% aos 91 dias.

Figura 26 - Absorção de água para misturas contendo ARCD.



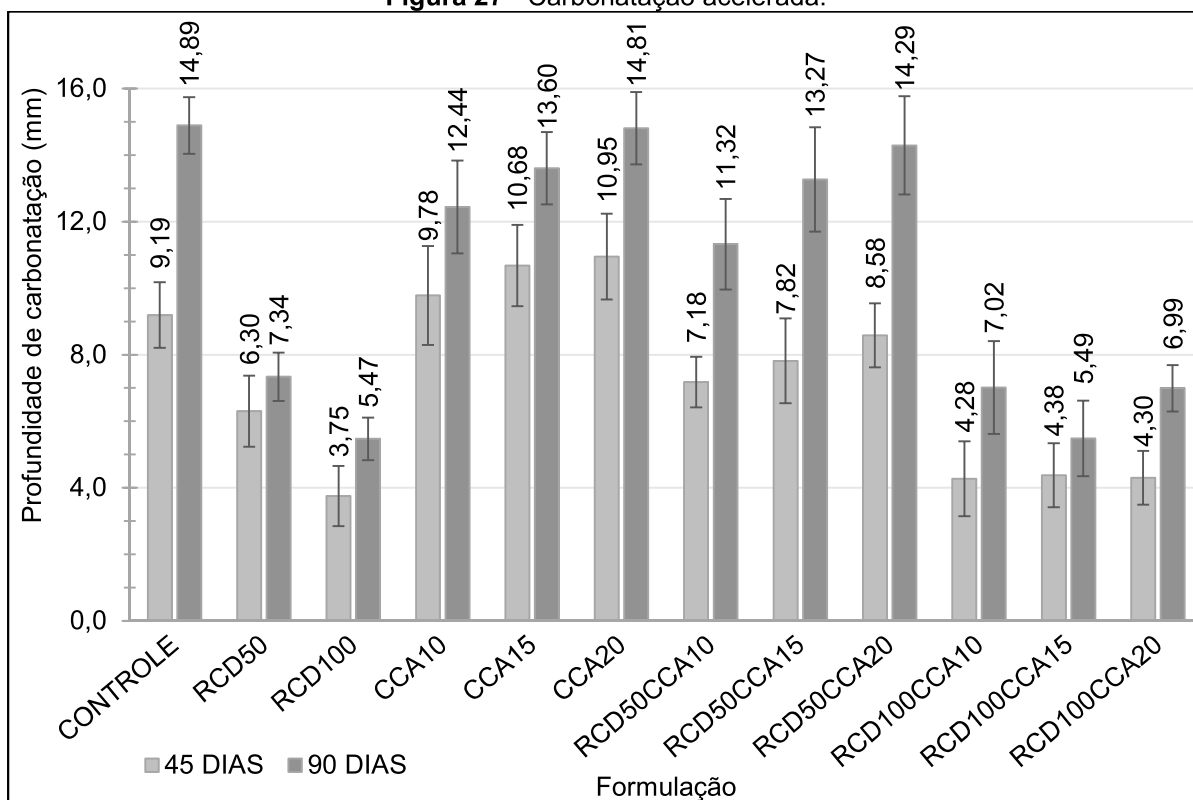
Fonte: a autora.

A partir dos resultados, percebe-se que a utilização da CCA em combinação com o ARCD é uma maneira eficiente de tornar a microestrutura menos porosa e, consequentemente, com menor capacidade de absorção de água.

Prameetthaa *et al.* (2015) observaram menor capacidade de absorção de água para as misturas contendo CCA e ARCD que as misturas contendo apenas o agregado reciclado. As reduções na absorção de água foram entre 9,8% e 16,9%. Os pesquisadores atribuem a redução ao efeito de preenchimento dos poros presentes nas misturas com ARCD provocado pelo uso da CCA. As reações da CCA com os produtos de hidratação do cimento também são indicadas como responsáveis pela redução.

4.9 CARBONATAÇÃO ACELERADA

Os resultados dos ensaios de carbonatação acelerada do concreto aos 45 e 90 dias de exposição estão apresentados na Figura 27. Pela análise dos resultados, é possível observar uma relação inversa da carbonatação com o teor de ARCD.

Figura 27 - Carbonatação acelerada.

Fonte: a autora.

Os resultados mostram que, aos 45 dias de exposição, o tipo de agregado irá influenciar fortemente a profundidade de carbonatação. As misturas RCD50 e RCD100 obtiveram profundidade de carbonatação 31,4% e 59,2% menor que o valor apresentado pela mistura Controle, respectivamente. As misturas com CCA e agregados naturais apresentaram valores entre 6,5% e 19,1% superiores à Controle. As misturas com ARCD e CCA apresentaram valores maiores que a respectiva mistura com ARCD e sem uso de CCA, porém os valores foram menores que a mistura Controle. A Figura 28 apresenta alguns corpos de prova aos 45 dias de exposição, onde é possível observar visualmente a diferença nos resultados.

Figura 28 - Carbonatação aos 45 dias de exposição

Fonte: a autora.

Aos 90 dias, a mistura CCA20 apresenta carbonatação equivalente à mistura Controle e as demais misturas apresentam redução da profundidade. As misturas RCD50 e R100 obtiveram resultados 50,7% e 63,3% menores que a mistura Controle, respectivamente.

A mistura RCD100CCA15 apresentou o mesmo resultado de carbonatação que a RCD100. As misturas RCD100CCA10 e RCD100CCA20 apresentaram resultados 28% superiores à RCD100, porém os valores foram inferiores a profundidade de carbonatação medida para a mistura Controle, apresentando reduções acima de 50%.

As misturas com 50% de ARCD e diferentes teores de CCA apresentaram valores entre 54,3% e 94,8% maiores que a mistura RCD50, porém os valores foram menores que o obtido para a mistura Controle.

Soares *et al.* (2014) concluíram que o uso de ARCD não teve influência significativa na resistência à carbonatação do concreto e atribuíram esse desempenho à boa qualidade dos agregados utilizados, que foram fabricados a partir de concreto pré-fabricado de alta resistência. Os autores também observaram que a redução do fator a/c com o uso de SP provocou uma melhoria significativa na resistência à carbonatação, reduzindo a profundidade em cerca de 60% em comparação à mistura de referência.

Levy e Helene (2004) também relataram redução da profundidade de carbonatação do concreto utilizando ARCD. Os autores explicam que a argamassa presente no ARCD contém cimento e partículas de hidróxido de cálcio, que podem elevar a reserva alcalina no concreto, que atua protegendo a superfície do concreto contra a carbonatação.

Chatveera e Lertwattanak (2011) observaram que a profundidade de carbonatação foi maior nas misturas que utilizaram CCA em comparação ao concreto sem a adição, e que a profundidade carbonatação aumenta com o uso de teores de cinza mais elevados. Os autores justificam que o gel C-S-H hidratado irá liberar mais CaO, aumentando a carbonatação.

5 CONCLUSÕES

A partir da comparação das propriedades dos agregados reciclados e naturais, percebe-se a diferença na qualidade. Os agregados de RCD apresentaram menor massa específica, maior absorção de água e perda por abrasão com relação ao AN, influenciando em algumas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto endurecido. A maior absorção de água do ARCD, por exemplo, irá influenciar fortemente na trabalhabilidade e na absorção de água do concreto endurecido.

A análise da cinza de casca de arroz mostrou maior área superficial que o cimento e menor massa específica. Através do ensaio de difração de raios X, foi possível observar o pico que caracteriza a presença da sílica no material, sendo observado sua presença nas formas cristalina e amorfa. O ensaio de fluorescência de raios X confirmou a presença da sílica em percentual superior a 90% em massa. A CCA utilizada teve sua pozolanicidade confirmada no ensaio de Chapelle Modificado, mesmo apresentando teor de carbono elevado, 11% em massa.

A partir das misturas de concreto fabricadas pode-se chegar as seguintes conclusões:

- A trabalhabilidade do concreto é reduzida com o uso do ARCD e da CCA, sendo o impacto do agregado maior que o da adição. Tal fato se deve à estrutura mais porosa desses materiais, que absorvem maior quantidade de água da mistura que o AN e o cimento.
- O uso de ARCD em 50% e 100% de substituição ao AN produziu concretos com menor resistência à compressão axial que a mistura Controle em todas as idades avaliadas no estudo. Apesar disso, as misturas atingiram a resistência de dosagem estabelecida, 35 MPa. As misturas RCD50 e RCD100 não apresentaram diferença de resistência significativa entre si aos 28 e 91 dias de cura.
- As misturas de concreto com CCA e AN apresentaram, dentro da margem de desvio dos resultados, resistência à compressão equivalente à mistura Controle aos 28 e 91 dias.
- Ao utilizar o ARCD combinado com a CCA foi possível obter maior resistência à compressão que as misturas sem a adição mineral. Aos 28 dias, as misturas RCD50CCA15 e RCD100CCA10 já apresentavam valores superiores, enquanto as demais misturas apresentaram valores equivalentes às misturas

RCD50 e RCD100. Os resultados mostraram que o uso da CCA nas proporções utilizadas nesta pesquisa melhorou a resistência dos concretos fabricados com ARCD.

- O módulo de elasticidade das misturas foi mais influenciado pelo ARCD aos 28 dias. Aos 91 dias, as misturas RCD50 e RCD100 apresentaram valores equivalentes à mistura Controle. As misturas contendo CCA e AN apresentaram resultados equivalentes aos 28 dias e superiores aos 91 dias quando comparadas à mistura Controle. As misturas com ARCD e CCA apresentaram valores equivalentes ou superiores à respectiva mistura com ARCD e sem uso da adição em todas as idades avaliadas.
- As misturas com ARCD apresentaram aumento significativo de absorção de água. Com a incorporação da CCA, foi possível reduzir os percentuais de absorção aos 91 dias, obtendo valores equivalentes à mistura Controle em algumas misturas. Essa melhoria ocorre devido ao efeito de enchimento e das reações pozolânicas da CCA.
- A carbonatação apresentou elevada redução com a utilização do ARCD. O uso da CCA aos 45 dias de exposição apresentou maior profundidade de carbonatação que a mistura Controle, porém aos 90 dias de exposição foi possível observar redução na profundidade carbonatada das misturas com CCA em comparação à Controle. As misturas com 50% de ARCD e CCA apresentaram valores maiores que RCD50 e menores que Controle. A mistura RCD100CCA15 apresentou a mesma profundidade de carbonatação que RCD100, as demais misturas com 100% de ARCD e CCA apresentaram valores um pouco maiores que a mistura RCD100. A melhoria da resistência à carbonatação com o uso do ARCD pode ser atribuído à presença de mais cimento nas misturas.

Diante dos resultados obtidos nos ensaios realizados, é possível concluir que o uso da CCA nas misturas de concreto com ARCD foi eficiente para mitigar efeitos deletérios nas propriedades do concreto, fornecendo um material de qualidade comparável à mistura controle.

Os resultados indicam que os agregados de RCD é uma alternativa viável para produção de concreto com aplicação estrutural, desde que observadas as mesmas composições e propriedades apresentadas neste estudo. A variabilidade dos

agregados e da CCA podem produzir misturas de concreto com resultados distintos aos apresentados, sendo necessárias mais pesquisas sobre o impacto dessas variações nas propriedades do concreto. O uso desses materiais em grande escala, como na produção do concreto estrutural, representaria um importante ganho ambiental ao reduzir a demanda de matéria-prima e de resíduos descartados.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. JINDAL, G. D.; RANSINCHUNG, R. N. **Behavioural study of pavement quality concrete containing construction, industrial and agricultural wastes**. International Journal of Pavement Research and Technology, v. 11, n. 5, p. 488-501, 2018/09/01/, 2018.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776. Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR NM 67. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 51. Agregado graúdo – Ensaio de abrasão "Los Angeles"**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 248. Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 15116. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro: 12 p. 2004.

_____. **NBR NM 45. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 5739. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

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

_____. **NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR NM 53. Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009c.

_____. **NBR 15895. Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado**. Rio de Janeiro, 2010.

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

_____. **NBR 12653. Materiais pozolânicos — Requisitos** Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 5738. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 8522. Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2017.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2008**. São Paulo, 2009. Disponível em: < www.abrelpe.org.br >. Acesso em: 02/08/2018.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2009**. São Paulo, 2010. Disponível em: < www.abrelpe.org.br >. Acesso em: 02/08/2018.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2010**. São Paulo, 2011. Disponível em: < www.abrelpe.org.br >. Acesso em: 02/08/2018.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2011**. São Paulo, 2012. Disponível em: < www.abrelpe.org.br >. Acesso em: 02/08/2018.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2012**. São Paulo, 2013. Disponível em: < www.abrelpe.org.br >. Acesso em: 02/08/2018.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2013**. São Paulo, 2014. Disponível em: < www.abrelpe.org.br >. Acesso em: 02/08/2018.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2014**. São Paulo, 2015. Disponível em: < www.abrelpe.org.br >. Acesso em: 02/08/2018.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2015**. São Paulo, 2016. Disponível em: < www.abrelpe.org.br >. Acesso em: 02/08/2018.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2016**. São Paulo, 2017. Disponível em: < www.abrelpe.org.br >. Acesso em: 02/08/2018.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2017**. São Paulo, 2018. Disponível em: < www.abrelpe.org.br >. Acesso em: 07/11/2018.

ADNAN, S. H.; RAHMAN, I. A.; LOON, L. Y. **Performance of Recycled Aggregate Concrete Containing Micronised Biomass Silica**. International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology, v. 1, n. 2, p. 1-10, 2010.

ANDREU, G.; MIREN, E. **Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete**. Construction and Building Materials, v. 52, p. 227-235, 2014.

BAIRAGI, N. K.; RAVANDE, K.; PAREEK, V. K. **Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates**. Resources, Conservation & Recycling, v. 9, n. 1, p. 109-126, 1993.

BATISTA, A. D. B. **Efeitos de resíduos agroindustriais na resistência mecânica, porosidade e permeabilidade de argamassas e concretos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, CEFET-MG, Belo Horizonte.

BRASIL. **Resolução CONAMA N°307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil 2002.

BUI, D. D.; HU, J.; STROEVEN, P. **Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete**. Cement and Concrete Composites, v. 27, n. 3, p. 357-366, 2005.

CHAKRADHARA RAO, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V. **Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load**. Construction and Building Materials, v. 25, n. 1, p. 69-80, 2011.

CHATVEERA, B.; LERTWATTANARUK, P. **Durability of conventional concretes containing black rice husk ash**. Journal of environmental Management, v. 92, p. 59-66, 2011.

CHINDAPRASIRT, P.; RUKZON, S. **Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar**. Construction and Building Materials, v. 22, n. 8, p. 1601-1606, 2008/08/01/, 2008.

COLLATTO, D.; VIECILI, F. A.; ARNDT, J. A.; JESUS, R. T. **Utilização da sílica de casca de arroz na produção de concreto usinado em central**. In: Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis-SC. IBRACON.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; DE MORAES REGO FAIRBAIRN, E. **Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete.** Materials and Structures, v. 42, n. 7, p. 983-992, 2008.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. D. M. R.; HEMPEL, S. **Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash.** Cement and Concrete Composites, v. 33, n. 5, p. 529-534, 2011.

DUAN, Z. H.; POON, C. S. **Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars.** Materials & Design, v. 58, p. 19-29, 2014.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. **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.

FAN, Y.; XIAO, J.; TAM, V. W. Y. **Effect of old attached mortar on the creep of recycled aggregate concrete.** Structural Concrete, v. 15, n. 2, p. 169-178, 2014.

FERNANDES, I. J.; CALHEIRO, D.; KIELING, A. G.; MORAES, C. A. M.; ROCHA, T. L. A. C.; BREHM, F. A.; MODOLO, R. C. E. **Characterization of rice husk ash produced using different biomass combustion techniques for energy.** Fuel, v. 165, p. 351-359, 2016.

FERREIRA, L.; DE BRITO, J.; BARRA, M. **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.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. **Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete.** Construction and Building Materials, v. 22, n. 8, p. 1675-1683, 2008.

GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; GOMES, N. S.; SPERB, J. E. K. **Chloride penetration and carbonation in concrete with rice husk ash and chemical activators.** Cement and Concrete Composites, v. 29, n. 3, p. 176-180, 2007.

GIVI, A. N.; RASHID, S. A.; AZIZ, F. N. A.; SALLEH, M. A. M. **Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete.** Construction and Building Materials, v. 24, n. 11, p. 2145-2150, 2010.

GONÇALVES, P.; BRITO, J. D. **Recycled aggregate concrete (RAC) – comparative analysis of existing specifications.** Magazine of Concrete Research, v. 62, n. 5, p. 339-346, 2010.

GURSEL, A. P.; MARYMAN, H.; OSTERTAG, C. **A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash.** Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 823-836, 2016.

HABEEB, G. A.; MAHMUD, H. B. **Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material.** Materials Research, v. 13, n. 2, p. 185-190, 2010.

KHAN, R.; JABBAR, A.; AHMAD, I.; KHAN, W.; KHAN, A. N.; MIRZA, J. **Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete.** Construction and Building Materials, v. 30, p. 360-365, 2012.

KOU, S.-C.; POON, C.-S. **Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, v. 77, p. 501-508, 2015.

LEITE, M. B. **Avaliação das Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição.** 2001. 270 Doutorado em Engenharia Civil

(Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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, 2004/11/01/, 2004.

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

LOTFY, A.; AL-FAYEZ, M. **Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate.** Cement and Concrete Composites, v. 61, p. 36-43, 2015.

MADANDOUST, R.; RANJBAR, M. M.; MOGHADAM, H. A.; MOUSAVI, S. Y. **Mechanical properties and durability assessment of rice husk ash concrete.** Biosystems Engineering, v. 110, n. 2, p. 144-152, 2011.

MALEŠEV, M.; RADONJANIN, V.; MARINKOVIĆ, S. **Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production.** Sustainability, v. 2, n. 5, p. 1204-1225, 2010.

MARINKOVIĆ, S.; RADONJANIN, V.; MALEŠEV, M.; IGNJATOVIĆ, I. **Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete.** Waste Management, v. 30, n. 11, p. 2255-2264, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3a ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MEYER, C. **The greening of the concrete industry.** Cement and Concrete Composites, v. 31, n. 8, p. 601-605, 2009.

MUTHADHI, A.; KOTHANDARAMAN, S. **Experimental Investigations of Performance Characteristics of Rice Husk Ash-Blended Concrete.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 25, n. 8, p. 1115-1118, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5a ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

NIXON, P. J. **The use of materials from demolition in construction.** Resources Policy, v. 2, n. 4, p. 276-283, 1976.

_____. **Recycled concrete as an aggregate for concrete - a review.** Matériaux et Construction, v. 11, n. 65, p. 371-378, 1978.

OIKONOMOU, N. D. **Recycled concrete aggregates.** Cement and Concrete Composites, v. 27, n. 2, p. 315-318, 2005.

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

PADHI, R. S.; PATRA, R. K.; MUKHARJEE, B. B.; DEY, T. **Influence of incorporation of rice husk ash and coarse recycled concrete aggregates on properties of concrete.** Construction and Building Materials, v. 173, p. 289-297, 2018/06/10/, 2018.

PADMINI, A. K.; RAMAMURTHY, K.; MATHEWS, M. S. **Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, v. 23, n. 2, p. 829-836, 2009.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. **Carbonatação acelerada - estado da arte das pesquisas no Brasil.** Ambiente Construído, v. 7, n. 2, p. 7-20, 2007.

PCA. **Types and Causes of Concrete Deterioration**. IS536a ed. Portland Cement Association: 2002. p.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. **Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates**. Construction and Building Materials, v. 18, n. 6, p. 461-468, 2004.

PRAMEETTHAA, J.; BHARATKUMAR, B. H.; IYER, N. R. **Investigation on micronized biomass silica as a sustainable material**. Cement and Concrete Composites, v. 60, p. 25-33, 2015.

RADONJANIN, V.; MALEŠEV, M.; MARINKOVIĆ, S.; AL MALTY, A. E. S. **Green recycled aggregate concrete**. Construction and Building Materials, v. 47, p. 1503-1511, 2013.

RAMASAMY, V. **Compressive strength and durability properties of Rice Husk Ash concrete**. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 16, n. 1, p. 93-102, 2012.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; MAHDIKHANI, M.; AHMADIBENI, G. **The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes**. International Journal of Civil Engineering, v. 7, n. 2, p. 83-91, 2009.

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

SAFIUDDIN, M.; WEST, J. S.; SOUDKI, K. A. **Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash**. Cement and Concrete Composites, v. 32, n. 9, p. 708-717, 2010.

SALLES, P. V. **Avaliação mecânica e de durabilidade de concretos fabricados com resíduos de construção e demolição**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, CEFET-MG., Belo Horizonte.

SARAVANAN, M. M.; SIVARAJA, M. **Mechanical Behavior of Concrete Modified by Replacement of Cement by Rice Husk Ash**. Brazilian Archives of Biology and Technology, v. 59, n. spe2, 2016.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. **Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review**. Journal of Cleaner Production, v. 143, p. 598-614, 2017.

SOARES, D.; DE BRITO, J.; FERREIRA, J.; PACHECO, J. **Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance**. Construction and Building Materials, v. 71, p. 263-272, 2014.

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, v. 35, n. 6, p. 1195-1203, 2005.

TANGCHIRAPAT, W.; BURANASING, R.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. **Influence of rice husk-bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates**. Construction and Building Materials, v. 22, n. 8, p. 1812-1819, 2008.

VAN TUAN, N.; YE, G.; VAN BREUGEL, K.; FRAAIJ, A. L. A.; BUI, D. D. **The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete**. Construction and Building Materials, v. 25, n. 4, p. 2030-2035, 2011/04/01/, 2011.

XIAO, J.; LEI, B.; ZHANG, C. **On carbonation behavior of recycled aggregate concrete**. Science China Technological Sciences, v. 55, n. 9, p. 2609-2616, 2012.

XU, W.; LO, T. Y.; MEMON, S. A. **Microstructure and reactivity of rich husk ash**. Construction and Building Materials, v. 29, p. 541-547, 2012/04/01/, 2012.

YONG, P.; TEO, D. **Utilisation of recycled aggregate as coarse aggregate in concrete.** UNIMAS E-Journal of civil engineering, v. 1, n. 1, 2009.

ZHU, Y.-G.; KOU, S.-C.; POON, C.-S.; DAI, J.-G.; LI, Q.-Y. **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.



PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
Av Amazonas, 7675, Belo Horizonte-MG
www.civil.cefetmg.br/mestrado