



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

SÉRGIO ROBERTO DA SILVA
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DOS CONCRETOS COMPOSTOS COM
AGREGADOS GRAÚDOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E CINZA
VOLANTE, EM DIFERENTES TEORES DE SUBSTITUIÇÃO**

Porto Alegre
Março, 2017



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

SÉRGIO ROBERTO DA SILVA
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DOS CONCRETOS COMPOSTOS COM
AGREGADOS GRAÚDOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E CINZA
VOLANTE, EM DIFERENTES TEORES DE SUBSTITUIÇÃO**

Dissertação de Mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

ORIENTADOR: PROF. DR. JAIRO JOSÉ DE OLIVEIRA ANDRADE

Porto Alegre
Março, 2017

Ficha Catalográfica

S586c Silva, Sérgio Roberto da

Contribuição ao estudo dos concretos compostos com agregados graúdos de construção e demolição e cinza volante, em diferentes teores de substituição / Sérgio Roberto da Silva . – 2017.

71 f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientadora: Profa. Dra. Jairo Jose de Oliveira Andrade.

1. Sustentabilidade. 2. concreto. 3. resíduo de construção e demolição. 4. cinza volante. 5. propriedades mecânicas. I. Oliveira Andrade, Jairo Jose de. II. Título.



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DOS CONCRETOS
COMPOSTOS COM AGREGADOS GRAÚDOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E CINZA VOLANTE, EM
DIFERENTES TEORES DE SUBSTITUIÇÃO**

CANDIDATO: SERGIO ROBERTO DA SILVA

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

DR. JAIRO JOSÉ OLIVEIRA ANDRADE - ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA

**DRA. ANGELA BORGES MASUERO - DO PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO DA
ENGENHARIA CIVIL - UFRGS**

DRA. ELEANI MARIA DA COSTA - DO PGETEMA/FENG - PUCRS

PUCRS

Campus Central

Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - Sala 103 - CEP: 90619-900

Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625

E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br

www.pucrs.br/feng

Dedico este trabalho ao meu neto Theo Cavalcante Lotufo que em março de 2017 estará com 1 ano e 8 meses de idade. Quero dedicá-lo também à minha esposa Maria Denise da Silva pelo seu apoio e incentivo para a continuidade nas pesquisas.

AGRADECIMENTOS

Sem o apoio de algumas pessoas seria simplesmente improvável que se chegasse ao final deste projeto. Não seria possível finalizá-lo sem antes agradecer em especial algumas destas pessoas.

Ao Prof. Dr. Jairo José de Oliveira Andrade pela orientação, paciência e disponibilidade em todos os momentos em que precisei. Obrigado sobretudo por transmitir seus valiosos conhecimentos e também por acreditar no meu potencial.

Ao professor Felipe Zabala da Assessoria de Estatística FAMAT e ao professor Dr. Claudio Luiz Crescente Frankenberg da Coordenadoria Acadêmica da FENG pela dedicação e apoio no planejamento e análise de experimentos fatoriais realizado nesta pesquisa.

Presto meus agradecimentos aos laboratoristas José Eduardo R. da Cruz e Douglas Tischner Rodeghiero, aos alunos de graduação de engenharia civil da PUCRS Matheus Wenzel, Gabriela Holsbasch da Rocha, Denis Meira Buselatto, Luana Schemmer, Nathalia Schmidt e ao Eng.º Civil Jeferson Weber pela ajuda nas atividades laboratoriais.

Ao Eng.º Jonas Cesar Delazeri e Gerente de produção André Gomes dos Santos da Intercement S/A em disponibilizar a cinza volante que permitiu a realização desta pesquisa.

Ao meu filho Ismael Cavalcante da Silva que disponibilizou muitas horas do seu tempo para construir a câmara de carbonatação e ao Técnico em mecânica Gabriel Cirilo da Silva Simioni do Laboratório de Eólica por realizar toda a montagem hidráulica da câmara de carbonatação acelerada. Sem eles não seria possível realizar os ensaios de profundidade de carbonatação acelerada.

Ao Dr. André Luiz Marin Vargas da Faculdade de Física da PUCRS, em dedicar o seu tempo para auxiliar, orientar e realizar os ensaios de DRX.

A CAPES que me concedeu a bolsa para realizar este curso.

Enfim, a todas as pessoas amigas que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste trabalho e se fizeram presentes nesta jornada.

RESUMO

A busca de novos materiais para o emprego na indústria da construção civil se faz necessário nos dias atuais. O resíduo da construção e demolição (RCD) e os subprodutos das indústrias termoelétricas como a cinza volante são objetos de estudos em diversos segmentos da indústria da construção civil, e a adição destes materiais pode ser um dos esforços significativos para se alcançar uma construção mais sustentável. Neste trabalho foram estudadas a influência das interações e incorporações de RCD e cinza volante nas propriedades dos concretos. Para a caracterização dos materiais investigados foram utilizadas as técnicas de Difração de raios X (DRX), análise química por Espectrometria de Fluorescência de raios X (FRX) e análise de distribuição granulométrica à laser. Foram investigadas as propriedades mecânicas (compressão axial e tração por compressão diametral) e de durabilidade (absorção d'água e resistência à carbonatação) dos concretos com diferentes teores de RCD (25%, 50%, 75% e 100%) como agregado graúdo reciclado em substituição ao graúdo natural e adição de cinza volante (10%, 15%, 25% e 30%) em substituição ao cimento Portland em diferentes relações água/aglomerante (0,40, 0,45, 0,50, 0,55 e 0,65). Com base nos resultados observou-se que a adição de cinza volante em substituição ao cimento Portland em concretos com RCD causa uma redução nas propriedades mecânicas e de durabilidade nos concretos nas primeiras idades. Entretanto, à medida que o teor de cinza volante aumenta nos concretos com RCD há um aumento na taxa de resistência à compressão axial (f_{c91}/f_{c28}), e à medida que o tempo de exposição ao CO_2 vai se avançando o coeficiente de carbonatação tende a diminuir.

Palavras-Chave: Sustentabilidade. Concreto. Resíduo de Construção e Demolição. Cinza Volante. Propriedades Mecânicas. Carbonatação.

ABSTRACT

Nowadays, searching for alternatives materials for the construction industry has become imperative. Construction and demolition waste (CDW) and by-products from the thermoelectric industries, such as fly ash, are the subject of studies in several segments of the construction industry. Their use can be one of many significant efforts to achieve a more sustainable construction. This paper studies the influence of the interactions and incorporations of CDW and fly ash on the concrete properties. X-ray diffraction (XRD), X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) and particle size distribution analysis were used to characterize the investigated materials. The mechanical properties (compressive strength and splitting strength) and durability (water absorption and carbonation depth) of concrete with different CDW contents (25%, 50%, 75%, and 100%) were investigated as a coarse aggregate (10%, 15%, 25% and 30%) replacing Portland cement in different water/binder ratios (0.40, 0.45, 0.50, 0.55 and 0.65). Based on the results, it was observed that the addition of fly ash replacing the Portland cement in concretes with CDW causes a reduction in mechanical properties and durability of concretes in the early ages. However, as the fly ash content increases in concretes with CDW there is an increase in the compressive strength ratio (f_{c91}/f_{c28}), and as the time of exposure to CO₂ advances the carbonation coefficient tends to decrease.

Keywords: Sustainability. concrete. construction and demolition waste. fly ash. mechanical properties. carbonation depth.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Artigos sobre o uso de RCD e cinza volante em concretos publicado por ano.	16
Gráfico 2 - Composição dos agregados reciclados.....	19
Gráfico 3 - Difratogramas dos concretos com agregado reciclado com diferentes composições de resíduos de construção e demolição.....	24
Gráfico 4 - A resistência à compressão média dos concretos com agregado reciclado em diferentes idades.....	27
Gráfico 5 - Absorção d'água por imersão dos concretos com agregado reciclado. ...	28
Gráfico 6 - Taxa de carbonatação versus relação a/c para diferentes teores de substituição.	29
Gráfico 7 - Resistência mecânica das amostras aos 28 dias de idade.	31
Gráfico 8 - Análise da resistência à compressão axial nas idades de 3, 7, 28, 56, 90 e 180 dias de cura e relação água/aglomerante (a) 0,50 e (b) 0,40.	32
Gráfico 9 - Absorção d'água por capilaridade dos concretos com 0% 30% 40% e 50% de agregado reciclado e 15% de cinza volante.....	34
Gráfico 10 - A profundidade de carbonatação medida a diferentes tempos de cura em relação ao nível de substituição do areia natural por areia reciclada de concreto e diferentes teores de adição de cinza volante em substituição ao cimento Portland.	36
Gráfico 11 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e o tempo de exposição das amostras ao CO ₂	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Usinas termoelétricas movidas à carvão no Brasil.....	14
Tabela 2 - Composição química e propriedade mecânica e de durabilidade de concretos com diferentes tipos de cinza volante estudadas em diferentes pesquisas.	17
Tabela 3 - Propriedades físicas do agregado natural e agregados reciclados de diferentes origens.....	20
Tabela 4 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 91 dias de cura.	33

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Absorção	mm
f_c	Resistência à compressão axial	MPa
f_{tD}	Resistência à tração por compressão diametral	MPa
K	Coeficiente de carbonatação	mm/mês ^{0,5}
e_{CO_2}	Profundidade de carbonatação	mm

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 VARIABILIDADE DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	19
3.2 EFEITO DO RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) EM CONCRETOS	22
3.2.1 Análise microestrutural dos concretos.....	23
3.2.2 Propriedades mecânicas.....	25
3.2.3 Durabilidade de concretos com RCD.....	27
3.3 EFEITOS DA CINZA VOLANTE EM CONCRETOS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD).....	30
3.3.1 Efeito da cinza volante nas propriedades mecânicas dos concretos.....	31
3.3.2 Propriedades associadas com a durabilidade.....	34
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
4 MATERIAIS E MÉTODOS: ARTIGO	39
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63
REFERÊNCIAS.....	64
ANEXO A - SUBMISSÃO DO ARTIGO	71

1 INTRODUÇÃO

O aumento da taxa de industrialização e urbanização em função do crescimento econômico e populacional tornou a indústria da construção civil um dos segmentos que mais consome recursos naturais e gera resíduos sólidos que impactam de forma negativa no meio ambiente. Estima-se que a indústria da construção civil consome aproximadamente 50% de matérias-primas, 40% da energia total e gera 50% do total de resíduos (DABHADE; CHAUDARI; GAJBHAYE, 2014).

A indústria da construção civil é responsável por uma grande parcela das gerações de resíduos que impactam de forma negativa no meio ambiente (DABHADE; CHAUDARI; GAJBHAYE, 2014; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2014). A extração de matérias primas, o beneficiamento de materiais para a construção civil, as construções de edificações bem como reformas e demolições geram resíduos sólidos que, depositados de forma inadequada, podem trazer diversos problemas, tais como: proliferações de agentes transmissores de doenças, degradação das áreas de manancial e de proteção permanente, obstrução dos sistemas de drenagem, assoreamento de rios e córregos. Além dos problemas já mencionados, os resíduos sólidos da construção muitas vezes ocupam vias e degradam a paisagem urbana (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2014).

O concreto tem um papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico de um país, mas também tem um efeito negativo bastante significativo sobre o meio ambiente e sobre o esgotamento dos recursos naturais. Estima-se que a produção de cimento já ultrapassa a 4,6 bilhões de toneladas, o que representa o dobro da produção em 2014, que foi de 2,1 bilhões de toneladas. A Ásia produz mais de 80% do cimento no mundo e despeja na atmosfera 80% de CO₂ do total gerado pela produção de cimento Portland (MEDDAH, 2017). Com o objetivo de utilizar a energia e os recursos naturais de forma mais sustentável, algumas pesquisas (KHUNTHONGKEAW; TANGTERMSIRIKUL; LEELAWAT, 2006; LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012; MEDDAH, 2017) têm buscado alternativas para utilizar os resíduos sólidos provenientes de construção e demolição como subproduto para reutilização na indústria da construção civil, e desta forma

minimizar o impacto que estas indústrias causam ao meio ambiente (BERNDT, 2009; NAZARIMOFRAD; SHAIKH; NILI, 2016) .

Estudos de viabilidade do uso do resíduo da construção e demolição (RCD) em substituição ao agregado natural para a produção de concretos em pequenas quantidades tem apresentado resultados relevantes. Apesar das diferentes composições dos RCD em função de suas origens influenciarem diretamente nas propriedades mecânicas e durabilidade dos concretos (BRAVO et al., 2015), alguns autores (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012; LOTFI et al., 2015; POON; KOU; LAM, 2007) observaram que a substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado em teores inferiores a 30% pode apresentar benefícios no que se refere às propriedades mecânicas e na durabilidade dos concretos.

De acordo com Meyer (2009) e Aprianti et al. (2015), a redução da produção de cimento Portland seria uma das alternativas para diminuir o impacto ambiental, aonde uma das formas seria a utilização de subprodutos gerados por processos industriais, resíduos da agricultura e materiais reciclados. Dentre os diversos tipos de subprodutos que podem ser empregados, tem-se a cinza volante, que é um subproduto gerado pelas termoelétricas movidas à carvão mineral. Segundo Acar e Atalay (2013), muitas usinas termoelétricas foram construídas em um período de 80 anos em função da crescente demanda para geração de energia elétrica. De acordo com os autores, a produção anual mundial de cinza volante até 2013 foi de 500 milhões de toneladas, representando 75-80% da produção total de cinza oriunda da queima do carvão.

Conforme o último levantamento realizado, existem 24 unidades de usinas termoelétricas movidas à carvão em operação no Brasil segundo a ANEEL (2012), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Usinas termoeletricas movidas à carvão no Brasil.

Nome das Usinas	Município	Número de Unidades	Tempo de operação (anos)	Produção (MW)	Eficiência energética (%)
UTE Figueira	Figueira/PR	3	53	24	14,8%
UTE Complexo Jorge Lacerda - JLA	Capivari da Baixo/SC	4	51	232	25,6%
UTE Complexo Jorge Lacerda - JLB	Capivari da Baixo/SC	2	37	262	28,4%
UTE Complexo Jorge Lacerda - JLC	Capivari da Baixo/SC	1	19	350	34,7%
UTE Charqueadas	Charqueadas/RS	4	54	72	20,5%
UTE São Gerônimo	São Gerônimo/RS	4	63	20	14,3%
UTE Presidente Médici - Fase A	Candiota/RS	2	42	126	24,5%
UTE Presidente Médici - Fase B	Candiota/RS	2	30	160	25,0%
UTE Presidente Médici - Fase C	Candiota/RS	2	5 anos	350	36,5%

Fonte: ANNEL (2012).

Limbachiya, Meddah e Ouchagour (2012) e Lima *et al.* (2013) observaram que o emprego de cinzas volantes em substituição parcial ao cimento Portland na produção de concretos melhora sua durabilidade, bem como contribui para a redução das emissões de CO₂. Para uma compreensão mais aprofundada da influência das cinzas volantes em concretos, Payá *et al.* (2002), Sakai *et al.* (2005), Moon *et al.* (2016) e Shaikh (2016) investigaram o papel deste subproduto na hidratação no cimento, bem como o processo de reação pozolânica.

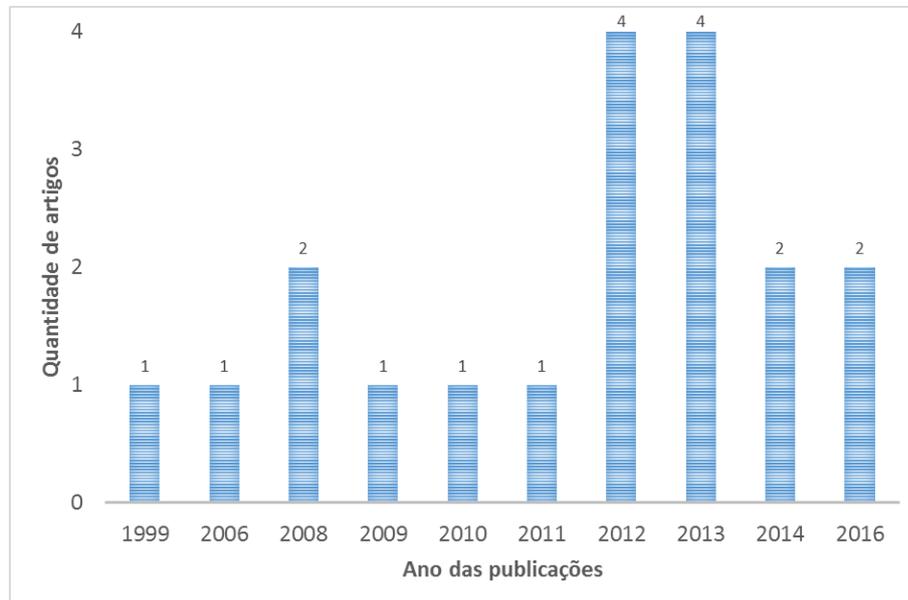
Outros trabalhos já foram realizados empregando-se simultaneamente a cinza volante e agregado reciclado em concretos (DABHADE; CHAUDARI; GAJBHAYE, 2014; KOU; POON; CHAN, 2007; LIMA *et al.*, 2013). Dabhade, Chaudari e Gajbhaye (2014) verificaram um ligeiro aumento na resistência à compressão axial nos concretos com agregado reciclado e 10% de cinza volante em comparação ao concreto apenas com agregado reciclado. Kou *et al.* (2004) verificaram que a adição de cinza volante em substituição parcial ao cimento aumentou a resistência à penetração de íons cloretos aos 90 dias de cura. Lima *et al.* (2013) concluíram que a adição de cinza volante em concretos com agregado reciclado, de modo geral, melhora a trabalhabilidade bem como as propriedades mecânicas e de durabilidade, reduzindo os efeitos negativos do agregado reciclado.

Nesse contexto, uma valiosa fonte de informação sobre o estado da arte de um objeto de pesquisa pode ser obtida através a realização da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS). A RBS é um método de pesquisa que busca responder questionamentos teóricos através da análise de conhecimentos de diferentes pesquisadores em um universo de artigos publicados de uma determinada área científica, bem como permite se definir os limites de uma investigação. De acordo com Levy e Ellis (2006), a RBS visa criar a base teórica, por meio de processo de coleta, compreensão, análise, compilação e avaliação dos artigos científicos publicados, a cerca de um determinado tema a ser pesquisado.

Com o objetivo de empregar o método de RBS para a análise do estado da arte do emprego de agregado reciclado proveniente da construção e demolição e cinza volante em concretos, empregou-se o método sugerido por Kitchenhan (2004). Desta forma, foi realizado um levantamento dos artigos publicados no período entre 1999 e 2016 nas bases de dados eletrônicas (Google Acadêmico, Periódicos CAPES e *Science Direct*). A pesquisa baseou-se nas seguintes palavras-chaves: agregado reciclado (*recycled aggregate*) combinado com cinza volante (*fly ash*) e concreto (*concrete*), limitando-se aos artigos publicados em língua inglesa.

Os artigos encontrados foram gerenciados e catalogados com o auxílio do software *Mendeley Desktop*. Foram encontrados um total de 19 trabalhos publicados em diferentes países, conforme apresentado no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Artigos sobre o uso de RCD e cinza volante em concretos publicado por ano.



Fonte: O Autor (2017).

Como pode ser observado no Gráfico 1, entre os anos 2014 e 2016 somente quatro artigos foram publicados tendo como foco o uso do RCD e cinza volante em concretos com diferentes teores de substituição. De acordo com os artigos publicados existe uma potencialidade do uso destes subprodutos na indústria da construção civil.

Os dados relacionados (Tabela 2) com a influência das cinzas volantes em concretos com resíduos da construção e demolição (RCD) foram obtidos a partir de pesquisas anteriores de diversos pesquisadores de diferentes partes do mundo entre o período de 2006 e 2016.

Tabela 2 - Composição química e propriedade mecânica e de durabilidade de concretos com diferentes tipos de cinza volante estudadas em diferentes pesquisas.

Referências	Composição Química				Área superficial (cm ² /g)	Resistências			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO		f _c	ec	Cl ⁻	A
Somna et al. (2012) (SOMNA; JATURAPITAKKUL; AMDE, 2012)	45,50	16,80	6,0	20,9	NI	+	+	+	+
Berndt M. L. (2009) (BERNDT, 2009)	47,58	26,42	12,19	5,54	3410	-	NE	-	-
Kim et al. (2013) (KIM; SHIN; CHA, 2013)	48,80	NI	NI	NI	3360	-	NE	+	NE
Kou et al. (2012) (KOU; POON, 2012)	56,79	28,21	5,31	<3	3960	+	-	+	+
Kou et al. (2013) (KOU; POON, 2013)	56,79	28,21	5,31	<3	3960	-	-	+	NE
Kou et al. (2008) (KOU; POON; CHAN, 2008)	56,79	28,21	5,31	<3	3960	-	-	+	NE
Lima et al. (2013) (LIMA et al., 2013)	46,90	28,50	6,22	2,30	NI	+	-	+	+
Limbachiya et al. (2012) (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012)	50,40	28,00	9,00	6,00	2800	-	+	+	-
Sim et al. (2011) (SIM; PARK, 2011)	58,20	26,7	5,00	NI	3550	-		+	+
Zong et al. (2014) (ZONG; FEI; ZHANG, 2014)	51,21	26,10	9,60	4,10	NI	-	-	+	-

NI: Não Informado, NE: Não realizado ensaio; "-": Piora, "+": Melhora, f_c: Resistência a compressão axial, ec: Carbonatação, Cl⁻: Íons Cloretos, A: Absorção.

Fonte: O autor (2017).

Observou-se que é dada uma grande ênfase na influência da superfície específica das cinzas volantes nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos com RCD (CHINDAPRASIRT et al., 2004; JATURAPITAKKUL et al., 2004; KIATTIKOMOL et al., 2001). Porém outros estudos mostram que, além da composição química, o tamanho das partículas das cinzas volantes também influenciam nas propriedades dos concretos (SOMNA et al., 2012).

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a potencialidade do emprego de resíduo da construção e demolição (RCD) como agregado graúdo reciclado e cinza volante na produção de concretos de cimento Portland.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, podem ser destacados:

- avaliar a influência da substituição de RCD e da cinza volante nas propriedades mecânicas (resistência a compressão axial e tração por compressão diametral) dos concretos;
- avaliar a absorção d'água em concretos com diferentes teores de substituição de agregado natural por RCD e diferentes teores de adição de cinza volante em substituição ao cimento Portland; e
- analisar a influência da substituição de RCD e da cinza volante na penetração de CO₂ através de ensaios acelerados nos concretos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

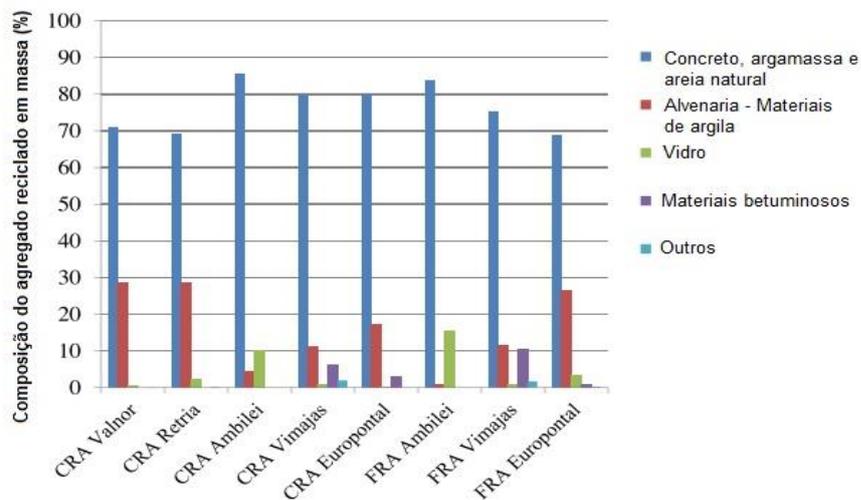
Este capítulo apresenta a variabilidade dos resíduos da construção e demolição (RCD) e os efeitos do RCD e da cinza volante nas propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral) e de durabilidade (absorção d'água, resistência à carbonatação e resistência a penetração de íons cloretos) nos concretos.

3.1 VARIABILIDADE DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

O termo Resíduos da Construção e Demolição (RCD) foi criado pela Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) de 2002. Trata-se de uma regulamentação da gestão dos resíduos da construção e demolição, como tijolos, blocos, telhas, concretos, entre outros.

Existe uma grande variabilidade nos agregados reciclados e isto está relacionado à tipologia construtiva, as técnicas construtivas aplicadas e os materiais disponíveis em cada região, cujos fatores contribuem para a composição do RCD. Bravo et al. (2015) coletou agregado reciclado de cinco unidades de reciclagem de diferentes regiões (Valnor, Vimajas, Ambilei, Eutopontal e Retria) da Europa, cuja distribuição percentual dos componentes de cada amostra está apresentada no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Composição dos agregados reciclados.



Fonte: Bravo et al. (2015).

De acordo com Bravo et al. (2015), com base na análise visual do agregado reciclado, o teor de concreto, argamassa e areia natural variaram entre 68% e 86%, e os materiais de alvenaria variaram entre 1% e 29%. Conforme os autores, estes resultados indicam a necessidade de maior de água na mistura quando utiliza-se os agregados reciclados.

A caracterização física do agregado natural e dos agregados reciclados de diferentes origens está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades físicas do agregado natural e agregados reciclados de diferentes origens.

Ensaio	Agregado reciclado graúdo					
	Agregado natural	Valnor	Retria	Ambilei	Vimajas	Europontal
Densidade Aparente (kg/m ³)	1350	1095	1236	1288	1261	1285
Absorção d'água (%)	1,5	8,6	8,4	9,9	6,4	5,5
Índice de forma (%)	17	24	24	14	25	21
Densidade partículas secas (kg/m ³)	2609	2091	2137	1928	2243	2262

Fonte: Bravo et al. (2015).

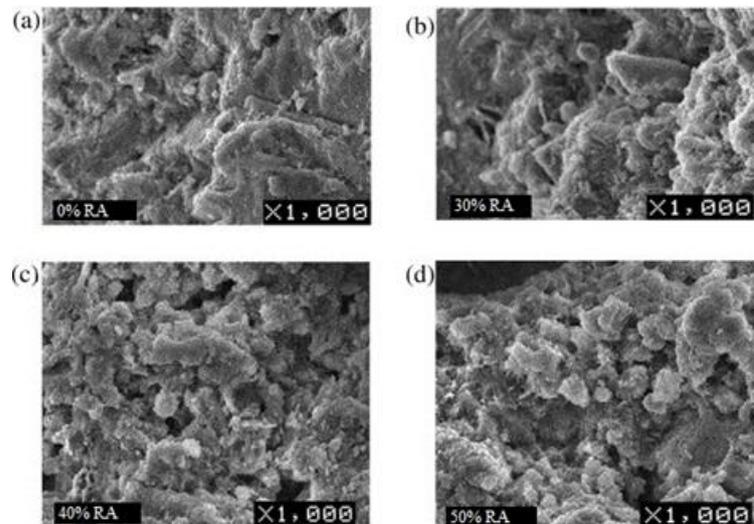
Segundo os autores, os agregados graúdos reciclados apresentaram menor densidade de partículas e maior absorção d'água quando comparado ao agregado natural. Na grande maioria das vezes esse fenômeno está relacionado com a porosidade intrínseca do material, que tende a diminuir a resistência mecânica dos concretos (CHOUSIDIS et al., 2016; WANG; PARK, 2015). Estes materiais tendem a diminuir a resistência mecânica, bem como aumentar a profundidade de carbonatação (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012; SIDERIS; SAVVA; PAPAYIANNI, 2006).

Shaikh (2016) coletou o agregado graúdo reciclado de uma unidade de resíduos em Perth, na Austrália. O autor observou que o resíduo era constituído de 78% de concreto, 13% de tijolos, 2,3% de asfalto e 5,7% de outros materiais, cujo mesmo apresentou uma de absorção d'água igual a 4,88%. Normalmente o agregado natural apresenta massa específica aparente mais baixa e a absorção da água mais elevada em comparação ao agregado reciclado. Pesquisas mostram que o uso do agregado graúdo reciclado em substituição ao agregado graúdo natural

diminui a resistência mecânica do concreto à medida que aumenta o teor de substituição. Estas afirmações estão baseadas nos estudos realizados por Leite (2001), Limbachiya; Meddah; Ouchagour (2012), Lima et al. (2013) e Zong, Fei, e Zhang (2014).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica bastante empregada para caracterizar matrizes de concretos com RCD. Nesse contexto Zong, Fei e Zhang (2014) analisaram concretos com 0%, 30%, 40% e 50% de teor de substituição de agregado reciclado por agregado natural, e 15% em massa de cimento Portland em substituição à cinza volante, cujos resultados estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Análise dos concretos com agregado graúdo reciclado por MEV.



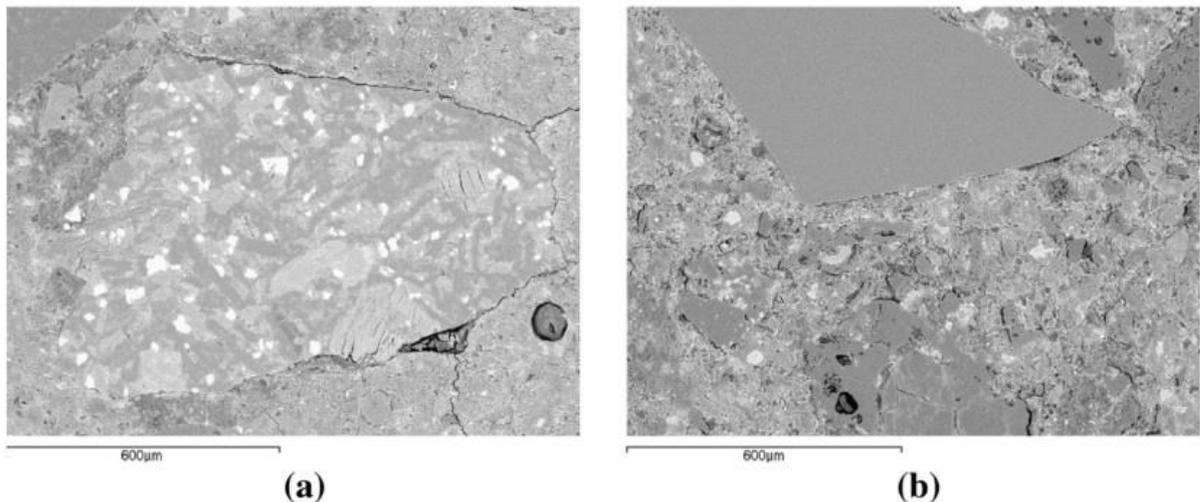
(a) 0% AR; (b) 30% AR; (c) 40% AR; (d) 50% AR.

Fonte: Zong, Fei e Zhang (2014).

Os autores observaram que a substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado (AGR) altera de forma negativa a microestrutura do concreto. Enquanto o concreto de referência apresenta uma formação de uma estrutura de pasta densa (Figura 1(a)) os concretos com AGR apresentam em suas estruturas porosidades em função da alta permeabilidade dos agregados reciclados (Figuras 1(b)(c)(d)).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite analisar a micro porosidade dos concretos com agregado reciclado. Bravo et al. (2015) produziram concretos com agregado miúdo reciclado de diferentes origens (Vimajas e Ambilei) e os resultados do MEV estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Análise dos concretos com agregado miúdo reciclado de diferentes origens por MEV.



Origem (a) Vimajas (b) Ambilei
Fonte: Bravo et al. (2015).

Os autores verificaram que a adição de agregado miúdo reciclado causou um aumento de porosidade nos concretos, levando ao aumento da absorção de água por imersão. O concreto com agregado miúdo reciclado de origem Vimajas (Figura 2(a)) apresentou maior porosidade em comparação ao concreto produzido com agregado miúdo de origem Ambilei (Figura 2(b)). Esta diferença pode estar ligada ao elevado teor de materiais cerâmicos nos agregados miúdos de origem Vimajas.

3.2 EFEITO DO RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) EM CONCRETOS

O uso dos RCD como agregado (gráudo ou miúdo) em substituição aos agregados naturais para a produção de concretos vem sendo estudado por diversos autores (BRAVO et al., 2015; LOVATO et al., 2012; LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012). De uma forma geral verificou-se que o uso do agregado gráudo

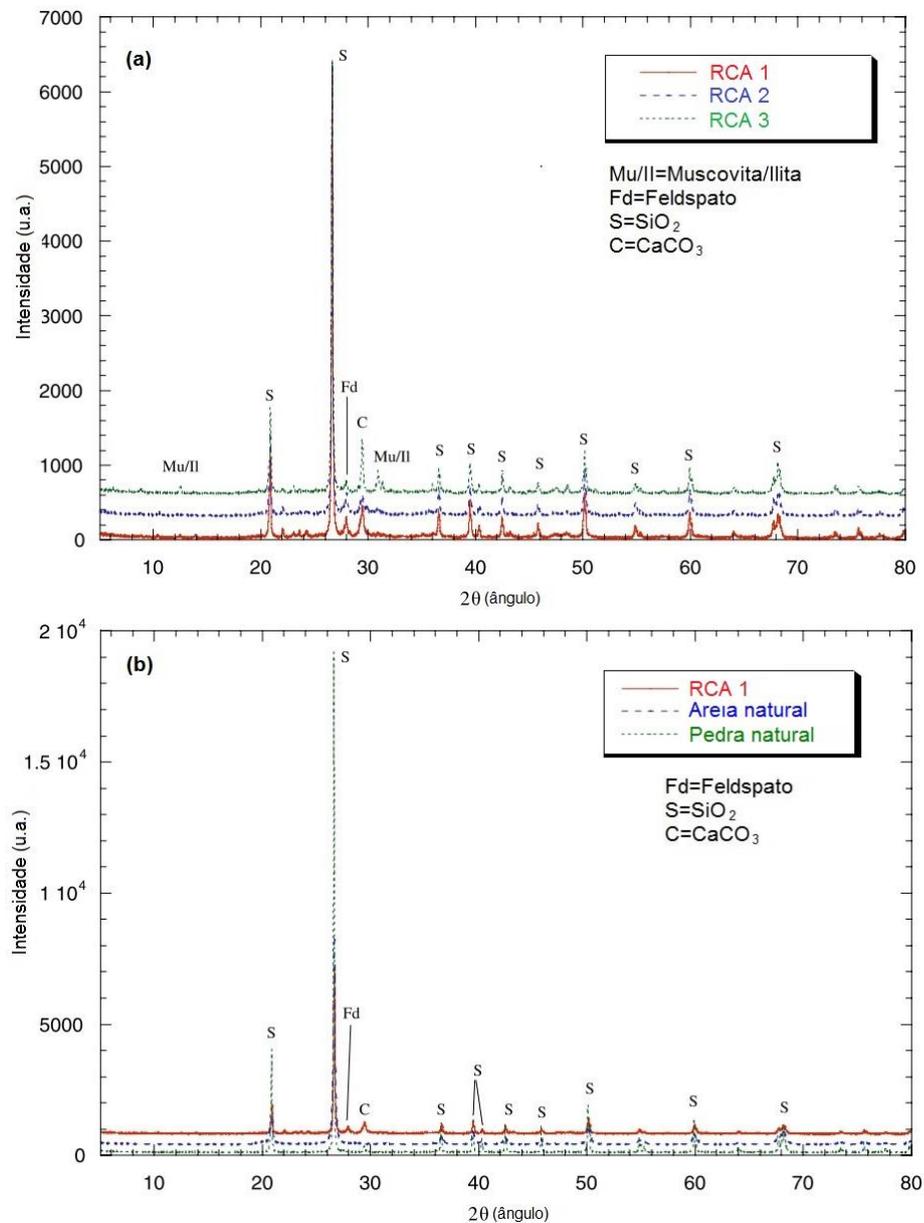
reciclado em substituição ao agregado graúdo natural diminui a resistência mecânica do concreto à medida que o teor de substituição é aumentado. Estas afirmações estão baseadas nos estudos realizados por Leite (2001), Limbachiya, Meddah e Ouchagour (2012) e Zong, Fei e Zhang (2014).

3.2.1 Análise microestrutural dos concretos

O estudo macroestrutural dos agregados reciclados é muito importante para se conhecer o comportamento dos concretos produzidos com RCD. As análises microestruturais também são importantes para se determinar as características químicas e mineralógicas destes concretos, bem como conhecer de forma mais aprofundada a microestrutura da matriz do cimento. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite uma análise microestrutural da porosidade dos concretos produzidos com RCD e permite avaliar o efeito nas características físicas que o agregado reciclado causa nos concretos.

Limbachiya, Marrchino e Koulouris (2007) visaram estabelecer características químicas e mineralógicas em concretos produzidos com agregado graúdo reciclado e seu desempenho. Foram coletadas amostras de resíduos da construção e demolição de três locais diferentes na região de Londres para a produção de agregado graúdo reciclado. Foram removidos do material coletado detritos e impurezas (químicas e físicas), cujos materiais coletados foram britados até chegar a uma dimensão máxima característica entre 8 mm e 4 mm. As amostras foram analisadas por meio de técnicas de fluorescência de raios X (XRF) e de espectrometria de difração de raio X (DRX) para estabelecer a composição química e mineralógica das amostras. Para a realização destes testes, as amostras tiveram que ser submetidas ao processo de moagem. (Gráfico 3).

Gráfico 3 - Difratogramas dos concretos com agregado reciclado com diferentes composições de resíduos de construção e demolição.



Concretos: (a) RCA 1 (92,4% de concreto, 1,9% de alvenaria e 4,9% de asfalto); RCA 2 (92,1% de concreto, 1,6% de alvenaria e 1,4% de asfalto); RCA 3 (85,5% de concreto, 5,3% de alvenaria e 3,3% de asfalto); (b) RCA 1 (92,4% de concreto, 1,9% de alvenaria e 4,9% de asfalto)

Fonte: Limbachiya, Marrochino e Koulouris (2007).

De acordo com os autores verificou-se a presença de calcita e picos menores de miscovita/ilita nos agregados reciclados. Com base na análise dos resultados os autores observaram que até 30% de teor de substituição de agregado graúdo reciclado não teve efeito sobre os principais óxidos, que são SiO_2 , Al_2O_3 e CaO . Porém, à medida em que se aumentou o percentual de agregado graúdo reciclado ocorreu uma diminuição no SiO_2 e um aumento no Al_2O_3 e CaO . Os agregados

grãos reciclados no estudo apresentaram características químicas e mineralógicas adequadas para a produção de concreto, e que os óxidos presentes na amostra não apresentaram nenhum efeito significativo nas propriedades do concreto.

3.2.2 Propriedades mecânicas

O efeito negativo nas propriedades mecânicas nos concretos com RCD está intimamente ligado ao aumento da porosidade da matriz, já que os RCD são mais porosos que os agregados grãos naturais (KOU; POON, 2012; LOTFI et al., 2015; MEDINA et al., 2014). Dabhade, Chaudari e Gajbhaye (2014) sugerem que este comportamento se deve à argamassa aderida em torno do RCD, que impede uma ligação adequada entre o substrato e o agregado reciclado. Todavia, alguns autores sugerem um teor de substituição de agregado grão natural por agregado grão reciclado de até 30% para que não haja uma influência significativa nas propriedades dos concretos (DILBAS; ŞİMŞEK; ÇAKIR, 2014; KHAN; LYNSDALE, 2002; LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012).

Medina et al. (2014) produziram dois grupos de concretos, sendo um grupo contendo agregado reciclado que não houve separação de resíduos como plásticos e madeiras (partículas flutuantes), considerado como agregado reciclado de baixa qualidade e outro grupo de concretos contendo agregado reciclado sem partículas flutuantes. Os autores procuraram analisar a influência dos concretos com partículas flutuantes nas propriedades físicas e mecânicas em comparação aos concretos sem as partículas flutuantes. Os teores de substituição de agregado natural por agregado reciclado foram de 25% e 50%, e as relações água/aglomerante 0,60 e 0,65. Os resultados da resistência à compressão axial observados pelos autores em todos os concretos com agregado grão reciclado, com idades de 7 e 28 dias, apresentaram resistências menores em comparação aos concretos de referência. Segundo os autores, em média, a resistência à compressão axial aos 28 dias de idade foi de 15% e 20% menor nos concretos com agregados reciclados em comparação aos concretos de referência. Todos os concretos com relação água/aglomerante 0,60 apresentaram maior resistência à compressão axial em comparação aos concretos

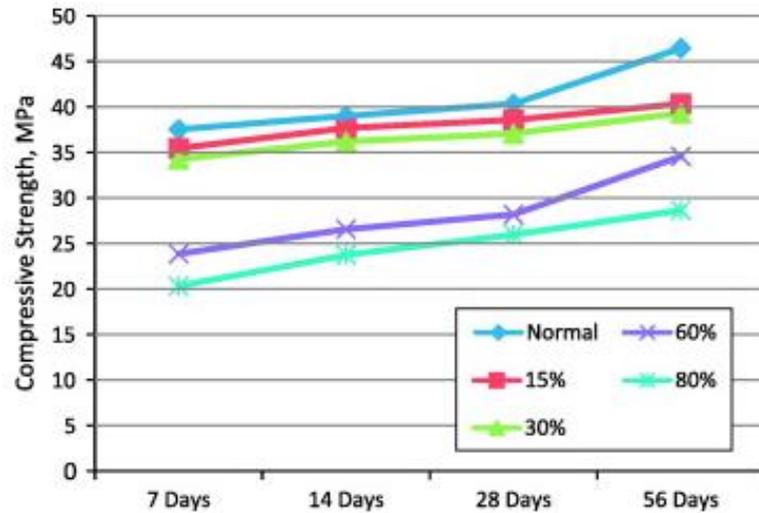
com relação água/aglomerante 0,65 em função da redução da porosidade. A resistência à compressão axial dos concretos com agregado gráúdo reciclado com partículas flutuantes foram menores que os concretos com agregado gráúdo reciclado sem partículas flutuantes.

Os autores sugerem que o efeito na diminuição da resistência à compressão axial dos concretos com agregado gráúdo reciclado está intimamente ligado aos materiais cerâmicos e asfálticos contidos no agregado reciclado que são materiais menos resistentes que os agregados naturais. De acordo com os autores, a redução na resistência dos concretos com agregado gráúdo reciclado e com materiais flutuantes ocorre pela fraca ligação entre as partículas flutuantes e a pasta de cimento.

Para uma análise de resistência à tração por compressão diametral, Matias et al. (2013) produziram concretos com 25%, 50% e 100% de teor de substituição de agregado gráúdo natural por agregado gráúdo reciclado. Os autores observaram que para os concretos com maior relação água/aglomerante as resistências à tração por compressão diametral foram menores. Porém, foi observado que a resistência dos concretos com agregado gráúdo reciclado ficou próximo à dos concretos de referência e, segundo os autores, um dos fatores que pode ter contribuído para este fenômeno é o agregado reciclado apresentar área de contato maior e ter textura mais áspera, o que melhora a ligação entre o agregado reciclado e o substrato.

Visando analisar a resistência à compressão axial em concretos com agregado reciclado, Kwan et al. (2012) produziram concretos com diferentes teores de substituição (15%, 30%, 60% e 80%) de agregado natural por agregado reciclado e com relação água/aglomerante 0,58. Os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio nas idades de 7, 14, 28 e 56 dias de cura (Gráfico 4).

Gráfico 4 - A resistência à compressão média dos concretos com agregado reciclado em diferentes idades.



Fonte: Kwan et al. (2012).

Os autores observaram que à medida que a idade avançava a resistência à compressão axial aumentava em todos os concretos. Contudo, as substituições de agregado natural por agregado graúdo reciclado apresentaram influência negativa na resistência à compressão axial dos concretos em comparação ao concreto de referência. Os autores sugerem que este comportamento está ligado à fraca qualidade da argamassa aderente do agregado reciclado que, quando submetida ao processo de trituração, criou as zonas fracas do concreto.

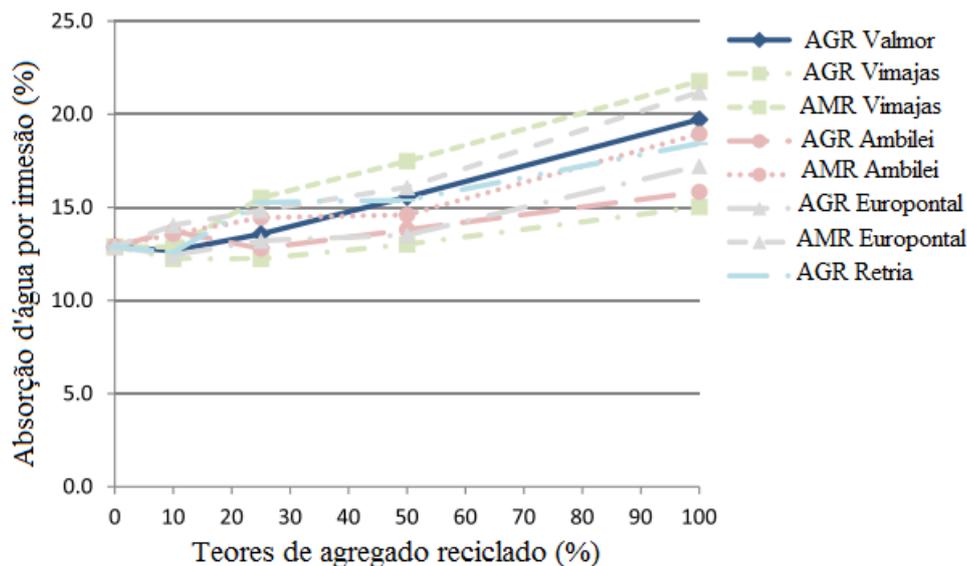
3.2.3 Durabilidade de concretos com RCD

A durabilidade do concreto depende, dentre outros fatores, da porosidade capilar, cuja mesma é função da relação água/aglomerante. Segundo Mehta e Monteiro (2008), os poros de ar incorporado apresentam sua forma característica esférica e dimensões superiores aos vazios capilares, que podem ser decorrentes do adensamento inadequado do concreto, que reduz a resistência mecânica e aumenta a permeabilidade do material. A durabilidade do concreto está diretamente ligada à sua porosidade que é a janela para ações de agressividade de agentes físicos, químicos e biológicos no interior do concreto. Com a adição de agregado reciclado nos concretos há um aumento na sua porosidade em função da porosidade inerente ao próprio agregado reciclado (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012; THOMAS et al., 2013).

Segundo Thomas et al. (2013), a absorção d'água dos concretos com 100% de agregado graúdo natural em substituição ao agregado reciclado, para relação a/c 0,65 aumentou 35% em relação ao concreto natural. Os autores observaram que à medida que a relação água/aglomerante é diminuída, a absorção d'água nos concretos com agregado reciclado também diminui em função da redução da porosidade.

Bravo et al. (2015) realizaram ensaios com agregado graúdo reciclado e areia reciclada de diferentes origens com teores de substituições de 10%, 25%, 50% e 100%, cujo resultados estão apresentados no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Absorção d'água por imersão dos concretos com agregado reciclado.



AGR = agregado graúdo reciclado; AMR = agregado miúdo reciclado.

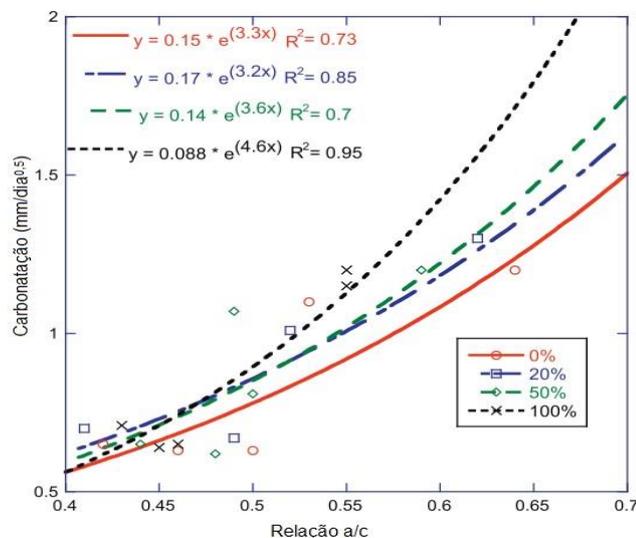
Fonte: Bravo et al. (2015).

Os autores observaram que o tamanho dos agregados tem grande influência na absorção d'água por imersão. A absorção d'água aumentou substancialmente à medida que o tamanho dos agregados diminuiu. Nas misturas com 100% de agregado graúdo reciclado de origem da Ambilei houve um aumento de 22,8% da absorção de água por imersão, enquanto que nas misturas com 100% de agregado graúdo de origem de Valmor o aumento atingiu 52,9%. Em termos de misturas com agregado graúdo reciclado de origem de Valmor, Europontal e Retria foi observado um aumento da absorção de água por imersão, o que se justifica pelo elevado teor

de cerâmica no agregado reciclado destas instalações de reciclagem (entre 17,1% e 28,6%). Nas misturas com areia reciclada, o aumento da absorção de água por imersão foi muito maior quando a areia reciclada era de origem de Vimajas e Europontal que foram utilizadas (68,9% e 64,3% respectivamente), que a areia reciclada de origem de Ambilei (46,9%). De acordo com os autores, este comportamento está relacionado à relação água/aglomerante nas misturas. Essas partículas finas, segundo os autores, cobrem os grãos de areia reciclada e adsorvem a água da mistura, além de dificultar a ligação adequada entre a areia reciclada e a pasta de cimento e enfraquecer a estrutura interna do concreto.

Um outro fenômeno físico-químico que resulta em mudanças na microestrutura e na redução do pH dos concretos é a carbonatação. Segundo Kulakowski (2002), este fenômeno pode despassivar o aço utilizado nas estruturas de concreto armado e permite a iniciação do fenômeno da corrosão das armaduras. Por este motivo é de suma importância que se realizem ensaios de profundidade de carbonatação nos concretos. Nesse sentido, Thomas et al. (2013) realizaram testes de carbonatação acelerada dos concretos com diferentes teores de substituição de agregado natural por agregado reciclado (0%, 20%, 50% e 100%) em diferentes idades (28, 56 e 90 dias) após a exposição ao CO₂, cujos resultados estão apresentados na Gráfico 6.

Gráfico 6 - Taxa de carbonatação versus relação a/c para diferentes teores de substituição.



Fonte: Thomas et al. (2013).

Segundo os autores houve um aumento significativo na taxa de carbonatação com a incorporação de agregado reciclado no concreto em função do aumento da porosidade em decorrência da porosidade inerente ao próprio agregado reciclado. Este comportamento também foi observado por outros autores (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012; SISOMPHON; FRANKE, 2007).

Kou, Poon e Chan (2008) realizaram o ensaio de penetração de íons cloretos em concretos com diferentes teores de substituição (20%, 50% e 100), adição de cinza volante (25%) em substituição parcial ao cimento Portland e com diferentes relações água/aglomerante (0,40, 0,45, 0,50 e 0,55). A concentração de NaCl foi de 3% e a penetração de íons cloretos nos concretos foram realizados com idades de 28 e 90 dias. Segundo os autores, a resistência de penetração de íons cloretos nos concretos melhorou à medida que a idade aumentou e que este fenômeno está ligado ao aumento no grau de hidratação. Foi observado um aumento significativo na penetração de íons cloreto quando o teor de agregado reciclado aumentou de 0% para 100%. Observou-se uma diminuição de 53% na carga total medida aos 28 dias para o concreto com 100% de agregado reciclado quando a relação água/aglomerante diminuiu de 0,55 para 0,40. Além disso, a adição de cinza volante diminuiu significativamente a penetração de íons cloreto. Segundo os autores a formação de mais produtos de hidratação com cinzas volantes, devido à ação pozolânica, pode bloquear o caminho de entrada de íons cloreto, e o resultado deste comportamento é o aumento da resistência à penetração.

3.3 EFEITOS DA CINZA VOLANTE EM CONCRETOS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

As cinzas volantes são resíduos industriais retidos nos filtros das caldeiras de usinas termoelétricas proveniente da queima do carvão em temperaturas entre 1200 e 1600°C. Trata-se de um pó heterogêneo que normalmente apresenta forma esférica, cujo diâmetro é menor que 45 μm e que pode ser altamente reativo (ABOUSTAIT et al., 2016; DAL MOLIN, 2011).

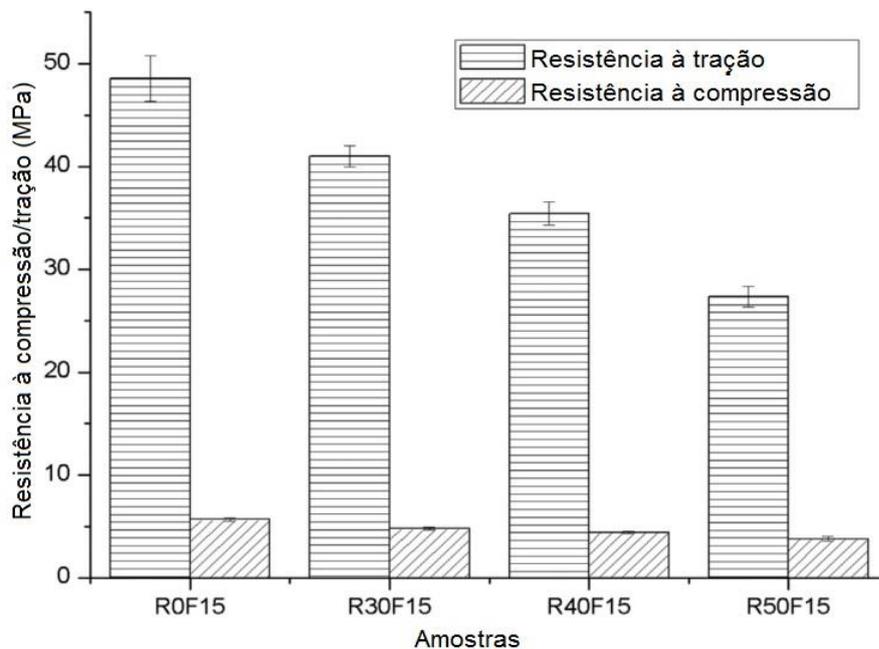
As cinzas volantes contêm baixo teor de cálcio e são classificadas, segundo a NBR 5736 (ABNT, 1991) como classe C. São tradicionalmente adicionadas na

fabricação de cimento e a maioria das cinzas volantes apresentam sílica, alumínio, ferro, cálcio e magnésio em suas composições. A superfície específica das cinzas volantes variam entre 300 a 700 m²/kg. A massa específica da cinza volante varia entre 1900 e 2400 kg/m³, enquanto que a massa específica do cimento Portland é de aproximadamente 3150 kg/m³ (DAL MOLIN, 2011).

3.3.1 Efeito da cinza volante nas propriedades mecânicas dos concretos

Segundo Ahmaruzzaman (2010), as cinzas volantes apresentam alta atividade pozolânica e são utilizadas como aglutinante de baixo custo na produção de concretos em indústrias. Para analisar os efeitos da adição de cinza volante em concretos com agregado reciclado na resistência à compressão axial, Zong, Fei e Zhang (2014) produziram concretos com 30%, 40% e 50% de teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado, e 15% em peso de cimento Portland em substituição à cinza volante. Os ensaios de resistência foram realizados aos 28 dias de idade (Gráfico 7).

Gráfico 7 - Resistência mecânica das amostras aos 28 dias de idade.

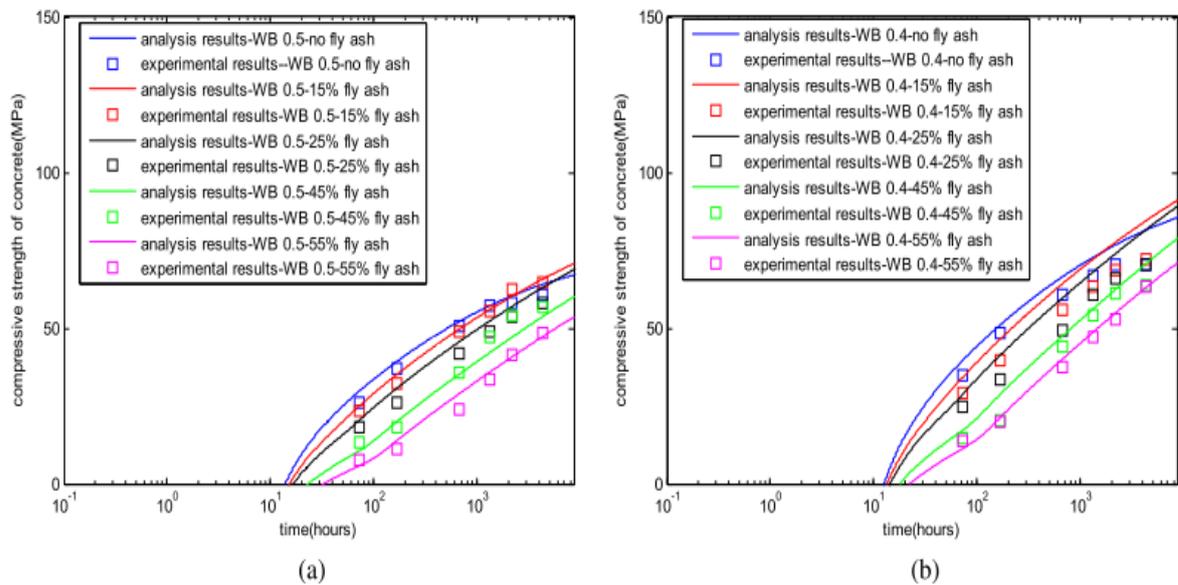


Fonte: Zong, Fei e Zhang (2014).

Segundo os autores, os concretos produzidos com 30% de agregado reciclado e 15% de cinza volante apresentaram resistência à compressão axial 16% menor em comparação ao concreto de referência. Já os concretos com 50% de agregado reciclado e 15% de cinza volante apresentaram resistência à compressão axial de 44% menor em comparação ao concreto de referência. Os autores sugerem que este efeito negativo na resistência à compressão axial nos concretos com agregado graúdo reciclado se deve ao agregado reciclado composto de tijolos de argila, que são bem mais fracos que os agregados naturais.

Wang e Park (2015) adicionaram 25% e 45% de cinza volante em substituição ao cimento Portland com diferentes relações água/aglomerante (0,19, 0,24, 0,30 e 0,50). Os ensaios foram realizados nas idades de 3, 7, 28, 56, 90 e 180 dias, cujos resultados estão apresentados no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Análise da resistência à compressão axial nas idades de 3, 7, 28, 56, 90 e 180 dias de cura e relação água/aglomerante (a) 0,50 e (b) 0,40.



Fonte: Wang e Park (2015).

Segundo os autores, à medida que o teor de adição de cinza volante é aumentado em substituição ao cimento Portland, a resistência à compressão nas primeiras idades tende a diminuir; porém ao longo do tempo a resistência à compressão aumenta para todos os concretos, tendendo a se aproximar ao concreto de referência. De acordo com os autores, a queda da resistência à

compressão axial nas primeiras idades está ligada à taxa de reação pozolânica e a distribuição de produtos de reação nos poros capilares diferentes entre o cimento Portland e a cinza volante.

A influência das cinzas volantes na resistência à tração por compressão diametral foi estudada por Kou, Poon e Chan (2008). Os autores produziram concretos com 20%, 50% e 100% de teor de substituição de agregado gráudo natural por agregado gráudo reciclado com 25% de cinza volante em substituição ao cimento Portland com diversas relações a/agl (0,40, 0,45, 0,50 e 0,55). Os corpos-de-prova foram ensaiados aos 4, 7, 28 e 90 dias de cura e os resultados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 91 dias de cura.

Experimento	Cinza Volante (%)	Agregado reciclado	Tração por compressão diametral (MPa)			
			(a/alg = 0,55)	(a/agl = 0,50)	(a/agl = 0,45)	(a/agl = 0,40)
R0	0	0	3,68	3,79	3,84	4,16
R20	0	20	3,56	3,64	3,72	4,12
R50	0	50	3,43	3,58	3,67	3,97
R100	0	100	3,25	3,41	3,49	3,76
R0F25	25	0	3,77	3,91	4,34	4,96
R20F25	25	20	3,56	3,84	4,01	4,34
R50F25	25	50	3,41	3,75	3,83	4,18
R100F25	25	100	3,35	3,63	3,77	4,05

Fonte: Kou, Poon e Chan (2008).

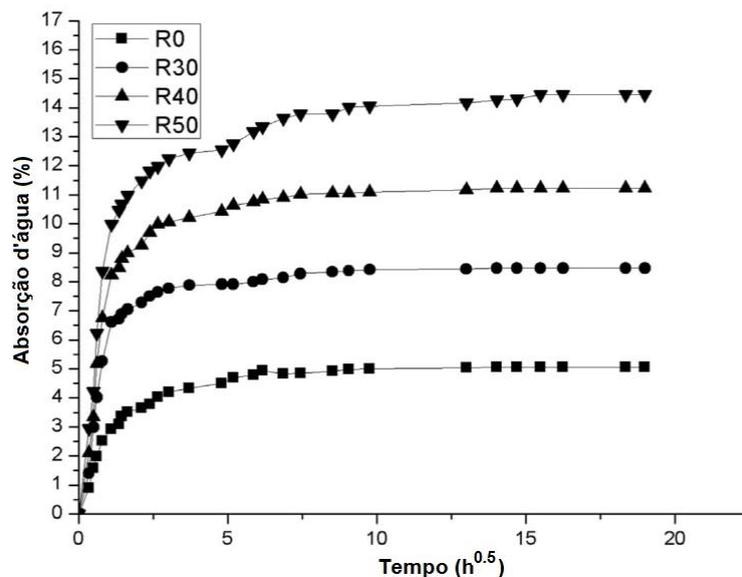
Os autores observaram que a resistência à tração por compressão diametral apresentou uma leve melhora com a adição de cinza volante em comparação aos concretos sem cinza volante. O concreto com 20% de agregado gráudo reciclado e 0% de cinza volante apresentou 5% menor de resistência em comparação ao concreto com 20% de agregado gráudo reciclado e 25% de cinza volante. De acordo com os autores, este comportamento está associado a reação pozolânica da cinza volante aos 90 dias de idade e à redução da porosidade em função das partículas finas destes aglomerantes.

3.3.2 Propriedades associadas com a durabilidade

Dentre os fatores que influenciam diretamente na durabilidade do concreto tem-se a porosidade do material, pois tal propriedade não só afeta a resistência mecânica como a sua durabilidade. O ensaio de absorção de capilaridade, que consiste na medição da velocidade à qual a água flui para a rede de poros capilares do concreto através de uma área superficial conhecida, permite avaliar a porosidade dos materiais compósitos a base de cimento. Para uma determinada mistura de concreto e idade, o teste de absorção de superfície inicial pode indicar aproximadamente o grau de porosidade (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012).

Zong, Fei e Zhang (2014) determinaram a absorção d'água com um grupo de amostras cúbicas com um comprimento de 100 mm, seco em temperatura de 60°C por quatro dias. Após a secagem uma secção de superfície das amostras (3 mm a 5 mm) ficou em contato com a água à temperatura ambiente, cujos resultados estão apresentados no Gráfico 9.

Gráfico 9 - Absorção d'água por capilaridade dos concretos com 0% 30% 40% e 50% de agregado reciclado e 15% de cinza volante.



Fonte: Zong, Fei e Zhang (2014).

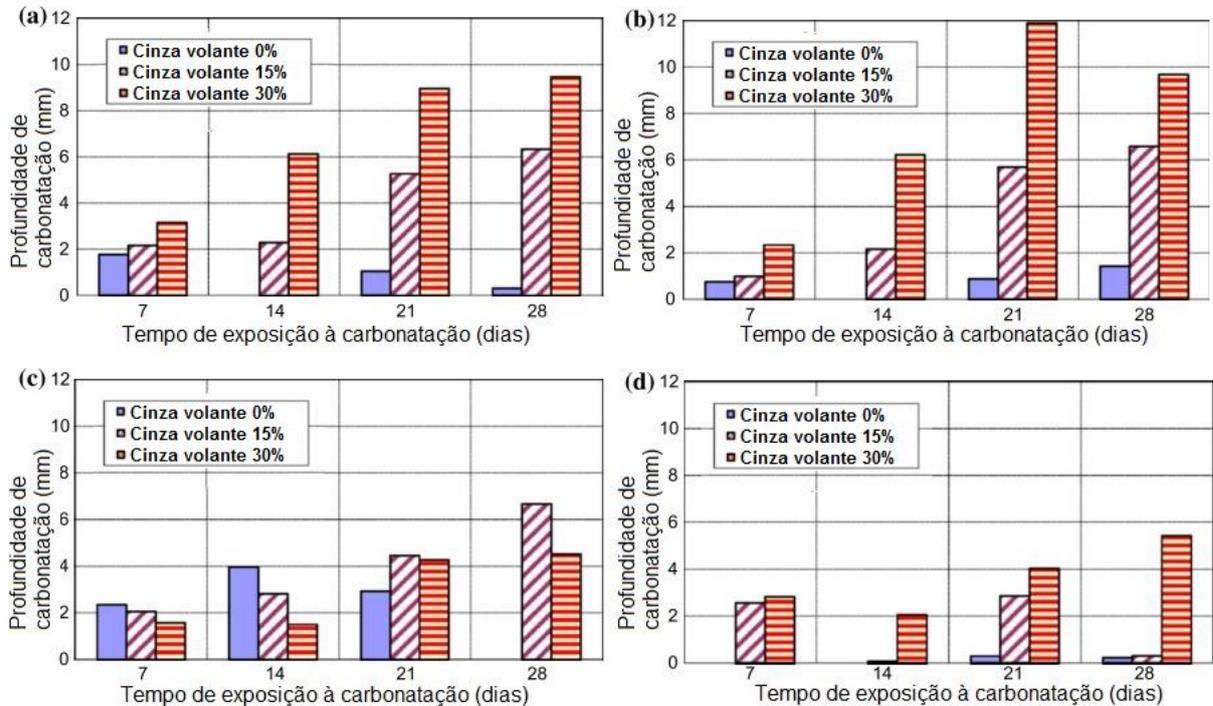
O concreto com agregado reciclado apresentou absorção d'água maior em comparação ao concreto de referência, que variaram entre 5,1% e 14,5% conforme o percentual de substituição de agregado natural por agregado reciclado. De acordo com os autores, os agregados reciclados apresentam porosidade mais elevada em comparação aos agregados naturais, e conseqüentemente os concretos com agregado reciclado apresentam maior absorção d'água em comparação ao concreto de referência.

Existem vários agentes agressivos presentes na natureza que contribuem para a deterioração da estrutura em concreto, reduzindo sua vida útil, cuja ação destes agentes está associada com as condições climáticas e ambientais. Entre estes agentes agressivos estão o CO_2 , Cl^- , O_2 e o H_2O , e o acesso destes agentes oportunistas no concreto são através da sua porosidade (HUANG et al., 2012).

O $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que é um dos constituintes da pasta de cimento, confere ao concreto uma alta alcalinidade, mantendo o pH da mistura entre 12-13. O $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em contato com o CO_2 presente no ambiente e uma umidade relativa de aproximadamente 60-80% desencadeia a carbonatação, que reduz o pH para valores próximos a 8-9. Quanto menor o pH mais suscetível o concreto está aos ataques químicos. A baixa alcalinidade no concreto provoca a despassivação da armadura e em presença de umidade e O_2 se dá o início da corrosão (SAETTA e VITALIANI, 2005; HUANG et al., 2012).

Sim e Park (2011) realizaram ensaios de carbonatação acelerada em concretos com areia reciclada de concreto, que apresentou absorção d'água de 6,45%. A relação água/aglomerante foi igual a 0,485 e os teores de substituição da areia natural por areia reciclada de concreto foram de 30%, 50%, 60%, 70% e 100%. A adição de cinza volante em substituição ao cimento Portland foi 15% e 30% em peso. Os corpos-de-prova cilíndricos foram curados sob condições de umidade relativa de 100% durante 7 dias em laboratório por mais 14 dias, totalizando em 21 dias de cura antes do início do ensaio de carbonatação acelerada. A concentração de dióxido de carbono empregada foi de 10%, com temperatura de 30°C e umidade relativa de 60%. Os resultados da profundidade de carbonatação encontram-se apresentados no Gráfico 10.

Gráfico 10 - A profundidade de carbonatação medida a diferentes tempos de cura em relação ao nível de substituição do areia natural por areia reciclada de concreto e diferentes teores de adição de cinza volante em substituição ao cimento Portland.



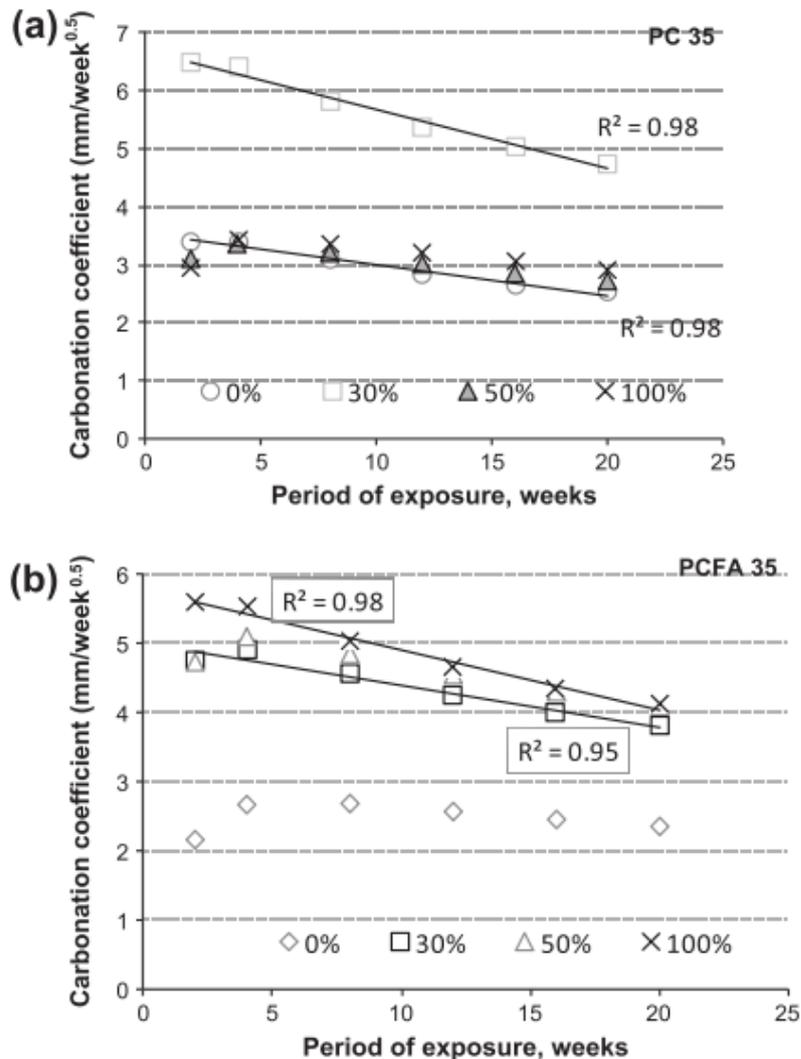
Concretos com adição de cinza volante de 0%, 15% e 30% em substituição ao cimento Portland e teores de substituição de areia natural por areia reciclada de: (a) 0% (b) 30% (c) 60% (d) 100%.

Fonte: Sim e Park (2011).

Os autores verificaram um aumento na profundidade de carbonatação à medida que o tempo de exposição aumentou. Observou-se que a profundidade de carbonatação foi desprezível nos concretos sem cinza volante, cujas mesmas foram maiores em concretos com 60% e 100% de areia reciclada de concreto em comparação ao concreto de referência e com 30% de cinza volante. Segundo os autores, este comportamento está ligado à natureza da areia reciclada de concreto que é dependente da propriedade do concreto que à originou.

Limbachiya e Meddah e Ouchagour (2012) realizaram um estudo da relação entre o coeficiente de carbonatação e o tempo de exposição dos concretos com agregado graúdo reciclado e cinza volante, cujos resultados estão apresentados no Gráfico 11.

Gráfico 11 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e o tempo de exposição das amostras ao CO₂.



(a) concretos com 0%, 30%, 50% e 100% de agregado graúdo reciclado; (b) concretos com 0%, 30%, 50%, 100% de agregado graúdo reciclado e 30% de cinza volante.

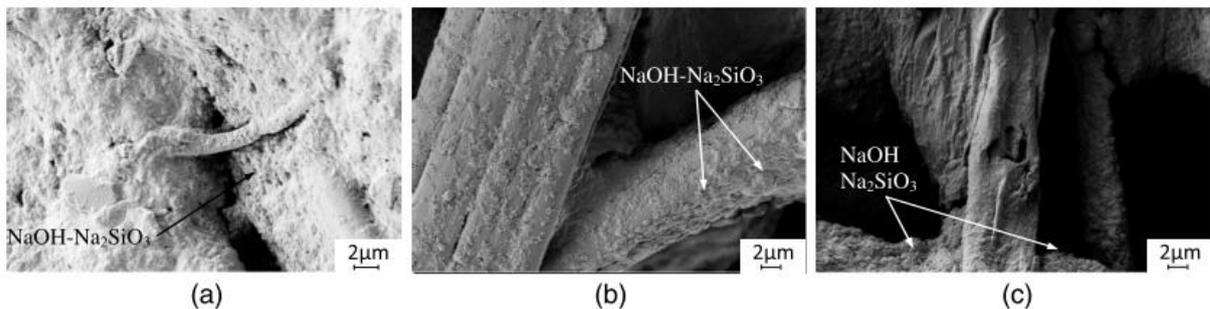
Fonte: Limbachiya, Meddah e Ouchagour (2012).

Os autores observaram que a taxa de carbonatação tende a diminuir à medida que o tempo de exposição dos concretos ao CO₂ aumenta. Segundo Thomas et al. (2013), o carbonato de cálcio bloqueia a rede de poros do concreto e reduz a difusividade do gás ao longo do tempo, logo o coeficiente de carbonatação tende a diminuir.

Mohammadina et al. (2015) utilizaram a técnica de microestrutura eletrônica de varredura (MEV) para analisar o efeito microestrutural dos concretos com diferentes tipos de agregado reciclado. O autor produziu três grupos de concretos com 4% de adição de cinza volante em substituição ao cimento Portland sendo, o

primeiro grupo de concreto contendo agregado graúdo reciclado de pavimento de asfalto, o segundo grupo de concreto com agregado graúdo reciclado de concreto e o terceiro grupo de concreto com tijolos esmagado como agregado graúdo reciclado. Os concretos foram ensaiados curados em uma câmara a uma temperatura de 40°C e ensaiados após 7 dias de cura, cujo resultado está apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Análise dos concretos com 4% de cinza volante e com diferentes tipos de agregado graúdo reciclado por MEV.



Os autores observaram que a microestrutura dos concretos é bastante diferente, e os produtos de geopolimerização do processo de ativação alcalina da cinza volante podem ser detectados na superfície dos agregados. As misturas com cinza volante contêm microestruturas muito porosas que parecem estar cercadas por uma crosta de produtos de reação.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A grande preocupação de alguns pesquisadores como Leite e Monteiro (2016), Limbachiya, Meddah e Ouchagour (2012) e Silva, de Brito e Dhir (2014) no que diz respeito ao uso de RCD para a produção de concreto está associada com a variabilidade da composição destes materiais, pois os resultados que se obtêm nas análises das propriedades mecânicas dos concretos produzidos com RCD estão diretamente relacionados com a origem e a constituinte destes materiais. Silva, de Brito e Dhir (2014), vão mais além e sugerem uma classificação dos resíduos da construção através do processo demolição seletiva.

4 MATERIAIS E MÉTODOS: ARTIGO

Procedimento experimental, resultados e discussão estão apresentados neste capítulo em forma de artigo, o qual foi submetido à revista *Construction and Building Materials*, conforme anexo A.

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND CARBONATION OF CONCRETES WITH CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE AND FLY ASH

Sérgio Roberto da Silva¹, Jairo José de Oliveira Andrade²

(1) *M.Sc. Candidate. Graduation Program in Materials Engineering and Technology – Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul (PGETEMA/PUCRS) e-mail: sergio.roberto@acad.pucrs.br*

(2) *Professor of Graduation Program in Materials Engineering and Technology – Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul (PGETEMA/PUCRS) e-mail: jairo.andrade@pucrs.br
PUCRS – Av. Ipiranga, 6681, Prédio 30, Bloco D sala 102. Porto Alegre – RS – Brazil . ZIP CODE:90619-900*

Highlights

1. Mechanical properties and durability of concretes with recycled aggregate and fly ash were evaluated.
2. Five levels of recycled coarse aggregate (RCA) substitution for construction and demolition waste (CDW) and 5 levels of fly ash in replacement Portland cement were investigated.
3. For results analysis, statistical analysis (ANOVA) and mathematical models were used.
4. The increase in the substitution level of natural aggregate by recycled aggregate reduces the mechanical properties.
5. The synergic effect of RCA and fly ash in carbonation process was investigated.

Abstract

The cement industry is one of the segments that release large amounts of carbon dioxide into the atmosphere during its manufacturing process, which consists of fuels burning. As the demand for concrete grows every year, the use of recycled coarse aggregate (RCA) in the construction industry can pose a significant effort to achieve a more sustainable construction. The present study investigated the mechanical properties (compressive and tensile strength) and durability (water absorption and carbonation depth) of concretes with different RCA substitution levels (25%, 50%, 75%, and 100%) instead of natural coarse aggregate, as well as replacement of Portland cement by fly ash in some levels (10%, 15%, 25%, and 30%) for different water/binder ratios (0.40, 0.45, 0.50, 0.55, and 0.65). All the results were statistically analyzed and showed that the mechanical properties decrease with the increase of replacement levels. Besides, the fly ash has a major influence on concretes with higher RCA replacement levels and water binder ratio. The carbonation of concretes with RCA and fly ash have a holistic effect, when 30% of replacement of cement by fly ash the carbonation over time was quite similar to the reference concrete.

Keywords: Concrete, recycled coarse aggregate, fly ash, mechanical properties, carbonation.

1 INTRODUCTION

The increase in industrialization and urbanization rates due to economic and population growth has turned the civil construction industry into one of the segments that consumes the most amount of natural resources, generating solid waste that negatively impacts the environment [1, 2]. Considering this scenario, it is possible to affirm that the use of recycled coarse aggregate (RCA) is an alternative to reduce the impact that those residues may cause to the environment. Limbachiya et al. (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012) suggest that incorporating the maximum amount possible of recycled material in concrete would contribute to the reduction of greenhouse gases emission as well as minimize the

amount of energy spent in concrete production. Must be pointed that the use of RCA in the production of new construction products has been considered one of the most efficient methods to add value to these materials, regarded as worthless (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2014). It is estimated that the annual production of cement is of approximately 1.6 billion tons, which corresponds to about 7% of the global load of carbon dioxide into the atmosphere; as for the production of concrete, it is estimated that between 10 and 11 billion tons of aggregates are consumed per year (MEHTA, 2001).

Seeking to use energy and natural resources more sustainably, some researchers have looked for alternatives to reuse the solid waste originating from construction and demolition in the construction industry itself, thus minimizing the industry's impact to the environment [6, 7, 8, 9]. In this context, feasibility studies for the use of RCA in substitution to natural aggregate in production of concrete have been carried out by several authors [10, 11, 12], showing the potential use of this material. Kou et al. (KOU; POON; CHAN, 2008) observed that for a w/c ratio of 0.55, concretes with 20% and 50% of RCA replacement by weight at 28 days had their compressive strengths reduced in 7.28% and 14.35% respectively, compared to reference concrete. However, Bajad et al. (BAJAD et al., 2015) replaced 20% of natural aggregate by RCA (w/c ratio = 0.50 at 28 days) by weight, and obtained results that were very close to reference concrete.

Another byproduct type, which has also been used in the construction industry for quite some time, is the fly ash, derived from burning pulverized coal during the power generation in thermal power plants. Several studies show that the use of fly ash partially replacing Portland cement in concrete production improves its durability and contributes to the reduction of CO₂ emissions [3, 15]. For a more in-depth understanding of the influence of fly ash in concrete, many studies have investigated the role of this byproduct in cement hydration as well as in the process of pozzolanic reaction [16, 17, 18, 19]. According to Chindaprasirt et al. [20], the use of fly ash as pozzolanic material tends to increase the durability of mortars and concretes due to pore refinement and reduction of calcium hydroxide in the matrix of cement paste. However, the effect of refining the pores, according to the authors, influence on concrete performance, it may occur to decrease drying and consequently lead to cracking and reduce concrete's ability to resist chemical attack.

Some researches show that the fly ash particles size has an important influence on the mechanical properties and durability of the concretes with supplementary materials. Chindaprasirt et al. (CHINDAPRASIRT; HOMWUTTIWONG; SIRIVIVATNANON, 2004) performed tests with mortars with different particle sizes. The authors used 3 different fly ash particle fineness for mortars production. The first one was produced with unsifted fly ash, for the second one the fly ash was sifted through a sieve with 200 μm , and for the third one the fly ash was sifted through a sieve with 325 μm . The modified slump was set at 110 \pm 5 mm, and the w/b ratio ranged between 0.40 and 0.50. The compressive strength of mortars with sifted fly ash were approximately 3% and 7.7% higher than the mortar with unsifted fly ash at 90 days. The authors performed other tests with mortars using finer particle of fly ash and observed that the higher the fineness of the fly ash particles the higher was the compression resistance gain of the mortars in comparison to natural ones. Based on this study, the authors concluded that fine fly ash with a more elevated specific surface were more reactive and consequently resulted in resistance increase in mortars, whose similar results were obtained by other researchers [17, 21, 22].

Other studies have already been performed using fly ash and recycled aggregate in concretes

[1, 15, 23]. Poon et al. (POON; KOU; LAM, 2007) performed tests in concretes (w/b equal to 0.55) with 20% of replacement of natural aggregate by RCA by weight and 25% of fly ash in partial replacement by weight for cement. The compressive strength at 90 days was 12.79% higher than the concrete with 25% RCA replacement by natural aggregate and without fly ash. Whereas the concrete with 50% of CDW and 25% of fly ash for the same w/b ratio and the same age was 7.87% higher than the concrete with 50% of RCA and fly ash.

In spite of some studies showing that the partial replacement of Portland cement by fly ash by weight in concretes with recycled aggregate improves their mechanical properties, Kim et al. (KIM; SHIN; CHA, 2013) observed that concretes produced with 30% of fly ash in cement replacement by weight showed a decrease in compressive strength with recycled aggregate. According to the authors, concretes with 30% of fly ash by weight and without recycled aggregate, with 30% of fly ash by weight and 30% of recycled aggregate by weight, and 30% of fly ash and 100% of recycled aggregates presented compressive strength inferior than the reference concretes in the order of 3%, 7% and 11% respectively at 91 days. According to Kim et al. (KIM; SHIN; CHA, 2013) and Lima et al. (LIMA et al., 2013), delay in the cement hydration process, leading to a slower strength development in the long term.

According to Aboustait et al. (ABOUSTAIT et al., 2016), fly ash comes from the combustion, melting, and then solidification of the mineral components of charcoal, which undergo chemical changes while passing through the burning process at the mills. The knowledge of fly ash composition allows a better understanding of the physicochemical properties of these materials. In Table 1 are presented the results of the chemical composition in the flying ashes found by other authors.

Table 1: Chemical composition determinate by other investigations

References	Chemical composition (%)			
	Portland Cement		Fly ash	
	Al ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	CaO
Limbachiya et al. (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012)	4.7	65.2	28.8	6
Kou and Poon (KOU; POON, 2012)	5.9	64.7	28.21	<3
Zong et al. (ZONG; FEI; ZHANG, 2014)	4.76	64.43	26.1	4.1
Atis (ATIŞ, 2003)	4.93	63.28	28.59	2.55

The physical properties and the chemical composition of the fly ash vary according to their origin and processing. Table 2 shows results found in other studies.

Table 2: Characterization of fly ashes from other studies

References	Chemical Composition				Specific surface (cm ² /g)	Mean Diameter (μm)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO		
Soma et al. (SOMNA; JATURAPITAKKUL; AMDE, 2012)	45.50	16.80	6.0	20.90	NI	28.60
Payá et al. (PAYÁ et al., 2002)	41.442	26.22	15.95	6.10	NI	30.71
Jaturapitakkul et al. (JATURAPITAKKUL et al., 2004)	46.25	26.43	10.71	7.61	2370	28.50
Challe et al. (CHALEE; JATURAPITAKKUL; CHINDAPRASIRT, 2009)	44.95	23.70	10.80	13.80	NI	30.00
Chindaprasirt et al. (CHINDAPRASIRT; JATURAPITAKKUL; SINSIRI, 2007)	45.69	24.59	11.26	12.15	NI	19.10

NI: Not informed

The mean diameter of the particles in the surveys carried out (Table 4) was of approximately 29.5 μm, while the mean diameter of fly ash used in this study was 46.04 μm. Kiattikomol et al. (KIATTIKOMOL et al., 2001) performed a study in mortars with milled and ground fly ash with different average sizes ranging between 1.9 and 17.2 μm and unground fly ash with average sizes ranging between 18.3 and 44.2 μm. The authors employed levels of 20% of Portland cement replacement and the compressive strength tests were performed at 7 and 28 days. According to the authors, the highest resistance values were obtained in mortars with finer fly ash due to the greater reactivity of particles to promote the pozzolanic reaction, whose sum of the main oxides (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃) was higher than 70%. The authors observed that the greatest influencing factor for mortar resistance was not the chemical composition, but the fly ash particle fineness.

Several studies showed that the effectiveness of pozzolanic reaction in cement matrix can be attributed to particles size, specific surface area and mineralogical composition [32, 33, 34]. Chindaprasirt et al. (CHINDAPRASIRT; JATURAPITAKKUL; SINSIRI, 2007) used two fly ash types in mortars: one with medium diameter of 19.1 μm (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ = 81.54%) and other, sieved and ground, with medium diameter of 6.4 μm (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ = 79.44%). The results showed that the hydration and pozzolanic reactions, packaging and nucleation effect were better with the use of sieved fly ash, resulting in a more homogeneous and compact matrix. Kiattikomol et al. (KIATTIKOMOL et al., 2001) verified that the mortar produced with original fly ash whose medium particle size ranged between 18.3 and 44.2 μm showed inferior resistance than the natural mortars at 3 and 90 days, and these results are closely related to the particles size, because the larger they are the higher the porosity and w/b ratio.

In this context, this research aims to present a contribution to the study of RCA and fly ash influences on the mechanical properties (compressive and tensile strength) and durability indicator (water absorption and carbonation resistance) in concrete.

2 EXPERIMENTAL PROGRAM

2.1 Materials

2.1.1 Cement and fly ash

In this study Brazilian early age strength cement was used (similar Portland Cement ASTM C 150 III), with specific gravity and compressive strength equal to 3.05 g/cm^3 and 54.1 MPa at 28 days, respectively. The fly ash used has a specific gravity of 1.98 g/cm^3 and bulk density of 0.85 g/cm^3 . The particle size distribution of the cement and fly ash are presented in Table 3.

Table 3: Particle size distribution

Diameters	Portland cement	Fly ash
Diameter at 10%	2.60 μm	6.61 μm
Diameter at 50%	11.34 μm	35.38 μm
Diameter at 90%	29.84 μm	101.67 μm
Mean Diameter	14.16 μm	46.04 μm

The chemical composition of the cement, fly ash and RCA are presented in Table 4.

Table 4: X-Ray fluorescence for materials used

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	LOI
Portland cement	19.45	4.86	64.44	0.62	0.7	2.94	0.2	0.78
Fly ash	61.3	19.3	6.00	1.2	2	0.4	0.2	0.99
RCA	39.9	6.2	26.1	3.2	1.3	0.7	0.4	14.94

LOI =Loss on ignition

It is observed in Table 4 that the fly ash presents 19.3% of Al₂O₃ in comparison to the cement (4.86%) and the amount of CaO in fly ash is equal at 6% compared to Portland cement (64.44%). Figure 1 shows the morphology of the cement particles and the fly ash.

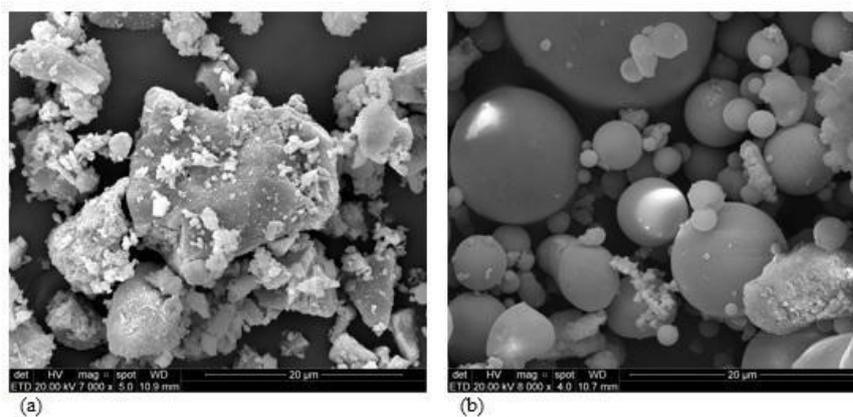


Figure 1: SEM of Portland cement (a) and fly ash (b).

The X-ray diffraction (XRD) (Figure 2) shows the presence of quartz, calcite, and muscovite/illite as crystalline phases all over the fly ash, as also observed in other studies [20, 35, 36, 37]. There is an amorphous halo in the area located between 18° and $28^\circ 2\theta$, and according to Moon, Oh and Choi (MOON; OH; CHOI, 2016) this is due to the content of amorphous phase. The content of quartz was the highest in the sample according to the result of the XRD analysis, as it was also observed in other studies [16, 20].

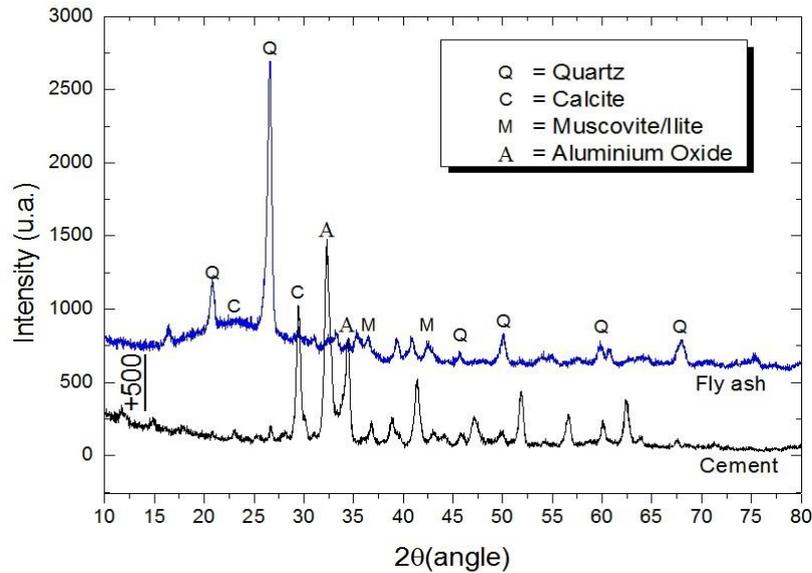


Figure 2: XRD standard of the fly ash and Portland cement

For the determination of the fly ash pozzolanic activity the Brazilian method NBR 7215 (ABNT, 1996) was used, with the result of the pozzolanic activity index being 76.4%. According to the standards the pozzolanic activity indices superior to 75% are considered reactive.

2.1.2 Aggregates

River siliceous sand was used as fine aggregate, with the coarse aggregate being basaltic. The RCA used as coarse recycled aggregate originates from an old building located in Porto Alegre/RS city, and was graded in a mechanical crusher. The physical characterization of the aggregates is presented in Table 5.

Table 5: Physical characterization of the aggregates

Test	Natural sand	Brazilian Standard	Coarse aggregate	RCA	Brazilian Standard
Specific gravity (g/cm ³)	2.61	NBR NM 52 (ABNT, 2009a)	2.81	2.57	NBR NM 53 (ABNT, 2009b)
Water absorption (%)	1.20	NBR NM 30 (ABNT, 2001)	0.80	5.23	
Bulk density (g/cm ³)	1.50	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1.42	1.25	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Fineness Module	2.75	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	8.32	8.26	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Maximum dimension (mm)	2.38		19	19	

Other works showed that the water absorption was similar to the one observed in this investigation. Kou and Poon (KOU; POON, 2013) obtained a value of 5.34% and Leite et al. (LEITE; FIGUEIRE DO FILHO; LIMA, 2013) found values equal to 5.5%. The particle size distribution of the natural coarse aggregate, the recycled coarse aggregate and the sand are

presented in Figure 3.

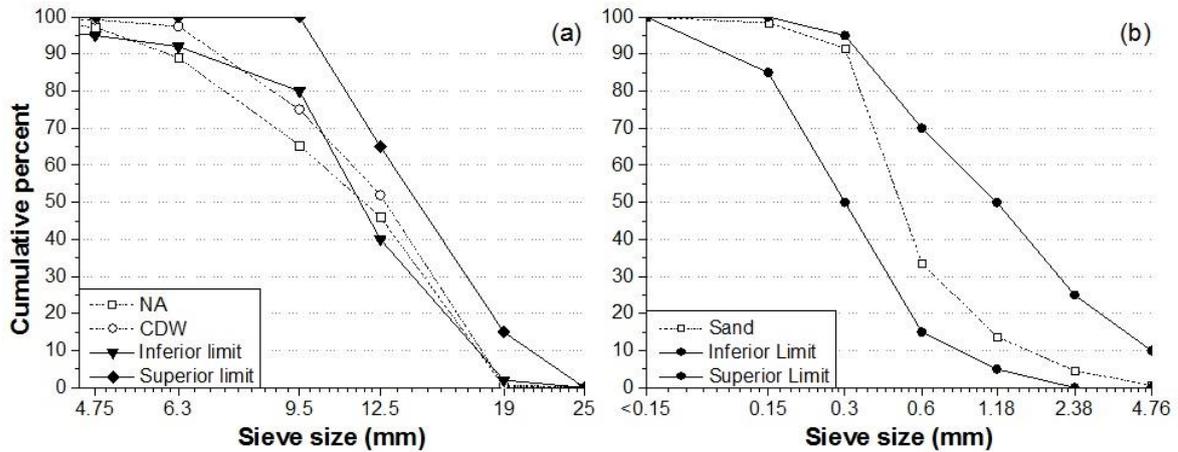


Figure 3. Particle size distribution: (a) NA = natural aggregate and RCA; Sand (b).

The RCA has 77% of mortar and mortar with stone, 8% of ceramics, and 13% of stone in its composition. The remaining 2% were composed of different materials (paper, wood, plastic, metal, among others), whose levels were removed by manual separation.

2.2 Experiment Design

The substitution percentages of natural aggregates by RCA and the replacement levels of cement by fly ash are shown in Table 6.

Table 6: Replacement levels used

Variables	Levels
Recycled coarse aggregate	0%, 25%, 50%, 75% and 100%
Fly ash (in weight)	0%, 15%, 20%, 25% and 30%
Water/binder ratio (w/b)	0.40 0.45 0.50 0.55 0.65

An experimental design was adopted, aiming at reducing the quantity of mixtures, and a fractional factorial project was used. Fractional designs allow cost optimization, since just a fraction of the total number of tests is performed. That methodology has been used and reported by some researchers [1, 11, 46, 47, 48].

To determine whether the RCA and fly ash content had a statistically significant effect on the concrete properties, an ANOVA was conducted. The F-test in the ANOVA analysis determined the existence of any significant differences between the properties investigated. If the p-value of the F-test was less than 0.05, the factor had a significant effect on the analyzed property at a confidence level of 95%; conversely, if the p-value was greater than 0.05, the replacement ratio did not show a significant effect.

For compressive strength, tensile strength, absorption and carbonation depth, a mathematical model that represents the behavior of RCA and fly ash concrete was obtained from experimental data. Nonlinear estimation analysis was used to construct the models, which

were considered satisfactory for an r^2 value of over 80%.

2.3 Concrete Production

All the concrete mixtures were performed using IPT/EPUSP's method (HELENE; TERZIAN, 1992). The workability was fixed at 90 ± 10 mm based in the slump test method and the mortar content (α) was equal to 55% for all concretes. The procedure for test specimen molding and curing was performed according to NBR 5738 (ABNT, 2015a).

When replacing natural aggregates for recycled ones, some adjustments in the concrete mix proportioning were necessary, such as volume compensation and presoaking the recycled aggregates in water. Considering that the specific mass of recycled aggregate was inferior to the specific mass of the natural aggregate, the volume compensation was performed (Leite et al. (LEITE; FIGUEIRE DO FILHO; LIMA, 2013), Lovato et al. (LOVATO et al., 2012)) through the Equation 1.

$$M_{AR} = M_{AN} * \frac{\gamma_{AR}}{\gamma_{AN}} \quad \text{Equation 1}$$

Where: M_{AR} = mass of recycled aggregate, in kg; M_{AN} = mass of the natural aggregate, in kg; γ_{AR} = specific gravity of recycled aggregate, in kg/dm³; γ_{AN} = specific gravity of natural aggregate, in kg/dm³;

It was established that the recycled aggregates would be presoaked for 24 hours before the beginning of materials mixing, in order to prevent water absorption from the mixture [11, 45]. This way, the definition of the concretes mixtures is presented in Table 7.

Table 7: Mix proportions for concretes with RCA and fly ash

Mixture	Proportioning	w/b	Fly ash (%)	Aggregates (kg/m ³)			C (kg/m ³)
				Sand	Natural aggregate	RCA	
R25F15	1:1.45:2	0.45	15	739	1015	928	505
R25F15	1:2.04:2.49	0.55	15	832	1008	922	403
R25F25	1:1.45:2	0.45	25	751	1031	943	513
R25F25	1:2.04:2.49	0.55	25	843	1021	934	408
R75F15	1:1.45:2	0.45	15	739	1015	928	513
R75F15	1:2.04:2.49	0.55	15	832	1008	922	409
R75F25	1:1.45:2	0.45	25	751	1031	943	521
R75F25	1:2.04:2.49	0.55	25	843	1021	934	415
R0F20	1:1.75:2.25	0.50	20	785	1009	923	448
R100F20	1:1.75:2.25	0.50	20	785	1009	923	462
R50F0	1:1.75:2.25	0.50	0	763	981	897	442
R50F30	1:1.75:2.25	0.50	30	796	1024	936	543
R50F20	1:1.15:1.76	0.40	20	662	1015	928	587
R50F20	1:2.64:2.98	0.65	20	881	995	910	340
R50F20	1:1.75:2.25	0.50	20	785	1009	923	455

2.4 Tests performed

2.4.1 Mechanical properties

The mechanical properties were evaluated at 7, 28, and 91 days. The compressive strength test (ABNT, 2007) and tensile strength (ABNT, 2011) were performed with cylindrical specimen tests (10 × 20 cm) of each mixture, according to Brazilian standard NBR 12655 (ABNT, 2015b).

2.4.2 Water absorption

The concrete water absorption test was determined according to Brazilian standard NBR 9778 (ABNT, 2005). Two test specimens for each mixture were tested at 28 days.

2.4.3 Accelerated carbonation test

A carbonation chamber with continuous supply of CO₂ was used, with an internal concentration equal at 3% in environment temperature. The internal pressure was equivalent to atmospheric pressure and the air relative humidity inside the chamber ranged between 65% and 75% (SUFIAN BADAR et al., 2014). The prismatic specimen tests, with dimensions of 10 × 10 × 30 cm, were introduced in the carbonation chamber after 28 days of submerged curing and 4 more days of drying in natural environment protected from the weather. The prismatic specimen tests remained inside the chamber for 23 weeks. The first carbonation depth measure was performed at 15 days after the CO₂ exposure, and the consecutive measures were performed each 30 days.

A solution of 1% phenolphthalein was sprayed onto the surface of the fractured prism, dissolved in 70% ethyl alcohol and 30% distilled water, to check the carbonation process over time, as done by other authors [55, 56, 57]. The method proposed by Pauletti (PAULETTI, 2009) and Kulakowski (KULAKOWSKI, 2002) was used to verify the carbonation depth, with the highest and lowest carbonation depths being measured and the average determined on each side, which represents the carbonated depth. The base and top of each sample were discarded and only the mean depths of carbonation from both sides of each sample were considered.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Statistical analysis and modeling

Based on the results obtained in experiments, the models were developed in Statistica software. A mathematical model was used for each variable (f_c , f_{tD} , A and e_{CO_2}), and each model represents the concretes behavior. Those models are presented in Equations 2 to 5, and the statistical significance of each model is presented in Tables 10, 11, 12 and 13.

$$f_c = 72,8963 - 84,8766 * \frac{w}{b} - 0,0446 * CDW - 0,4065 * FA + 3,4580 * \log\left(\frac{w}{b}\right) * Age + 0,0001 * FA^2 * \quad \text{Equation 2}$$

Age

$$R^2 = 0,93$$

$$f_{tD} = 6,53502 - 7,54351 * \frac{w}{b} - 0,00003 * CDW^2 - 0,01137 * FA - 0,00377 * Age + 0,40050 * \quad \text{Equation 3}$$

$$\log\left(\frac{w}{b} * Age\right) + 0,00001 * FA^2 * Age$$

$$R^2 = 0,82$$

$$A = -24,4441 + 50,9674 * \frac{w}{b} + 0,0193 * CDW + 0,0991 * FA + 0,0561 * Age \quad \text{Equation 4}$$

$$R^2 = 0,89$$

$$e_{CO_2} = -24,4441 + 50,9674 * \frac{w}{b} + 0,0193 * CDW + 0,0991 * FA + 0,0561 * Age \quad \text{Equation 5}$$

$$R^2 = 0,91$$

Where: f_c = compressive strength (MPa); f_{tD} = tensile strength (MPa); e_{CO_2} = carbonation depth (mm); A = absorption (%); FA = fly ash replacement (%); CDW = RCA replacement (%); w/b = water/binder ratio; Age = age of concretes (days).

The R^2 statistic indicates that the models fitted explained above 80% of the variability for all variables investigated. All the isolated effects and interactions that were significant for compressive strength (f_c), tensile strength (f_{tD}), water absorption (A) and carbonation depth (e_{CO_2}), have already been found out by several researchers [46, 59]. Lovato et al. (LOVATO et al., 2012) found out that the w/b ratio and the replacement levels of natural aggregate by RCA are statistically significant in almost concrete properties. All data presented in the session results and discussion were obtained using the ANOVA models.

3.2 Mechanical properties

3.2.1 Compressive strength (f_c)

Based on the results obtained from regression models, it is possible to verify the concrete mechanical properties behavior [1, 11]. Figure 4 shows the influence of fly ash in compressive strength (f_c) of concretes with 25% of RCA and w/b equal to 0.40, 0.50 and 0.60 at different ages.

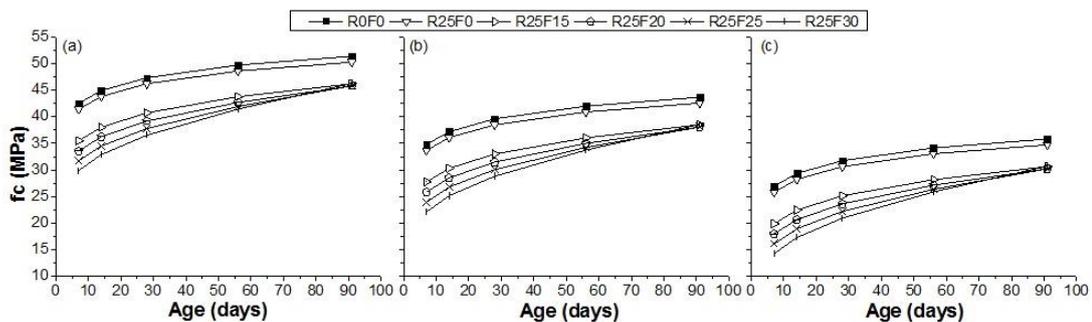


Figure 4: Influence of fly ash on concretes with RCA in compressive strength. w/b ratio (a) 0.40; (b) .0.50; (c) 0.60

The reference concrete (R0F0) presents higher compressive strength, and a decrease of approximately 4% can be observed for all ages with an increase of 25% of RCA. This behavior is closely associated with the increment of concrete porosity, considering that RCA is more porous than natural aggregates [26, 60, 61, 62]. Dabhade et al. (DABHADE; CHAUDARI; GAJBHAYE, 2014) suggest that this behavior is due to the mortar around the RCA preventing a proper binding between the new concrete matrix and the recycled aggregate. Other studies ([1, 14, 22, 37, 60, 63, 64, 65, 46]) observed that when the replacement level of RCA increases all mechanical properties tend to decrease. However, some authors suggest that a substitution of coarse natural aggregate by recycled aggregate from up to 30% doesn't have a significant influence in the concrete properties [3, 46].

An increase of the fly ash content leads to a more significant decrease in resistance at early ages (Figure 5(a)). The concrete R25F30 at 28 days (w/b ratio = 0.50) showed compressive strength values 25% lower compared to the R25F0 concretes (Figure 5(b)), and the results at 91 days showed a decrease of 10% in compressive strength. The results showed an increase in compressive strength at 7 and 28 days between the concretes R25F0 and R25F30 of approximately 12.45% and 23.20%, respectively, for all w/b ratios. This behavior tendency was also observed in other studies [17, 23, 21, 66].

Figure 5 compares the w/b ratio's influence over compressive strength growth ratios for 91 and 28 days concrete.

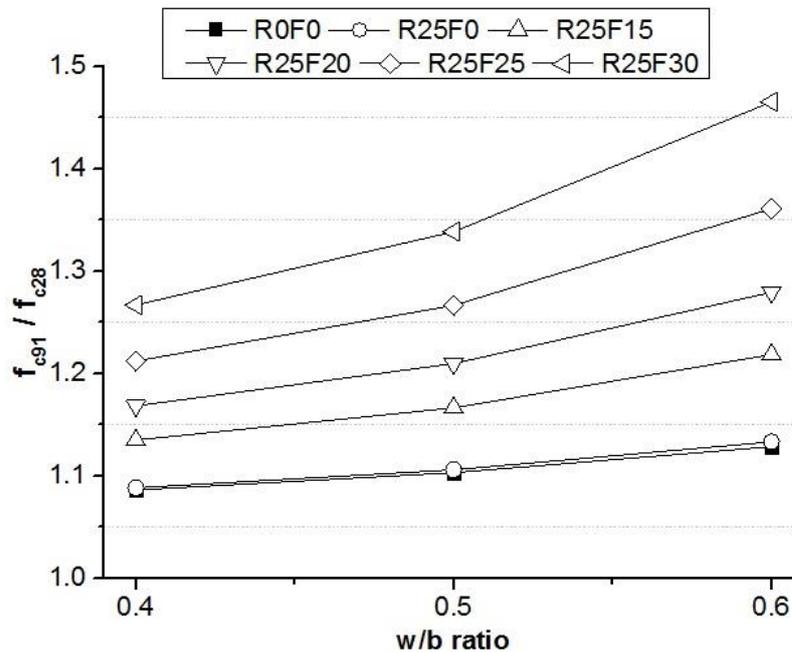


Figure 5: Influence of w/b ratio in the growth rate of compressive strength of concretes with 25% of RCA.

It can be observed that the use of 25% of RCA in concrete had no significant influence on the resistance rate in comparison to R0F0 concrete. The resistance rate of R0F0 and R25F0 concretes for the w/b ratio 0.60 was of 12.8% and 13.31%, respectively. Similar results were found by Poon et al. (POON; KOU; LAM, 2007), whose authors verified that for concretes R0F0 and R20F0 with w/b equal to 0.55, the resistance increase rate (f_{c90} / f_{c28}) was of 8.43% and 12.14%.

The influence of fly ash incorporation in compressive strength can also be observed. The R25F15, R25F25, and R25F30 concretes showed an increase of 21.84%, 36.10%, and 46.55%, respectively, for a 0.60 w/b ratio. Bajad et al. (BAJAD et al., 2015) investigated the compressive strength of concretes with 30% of RCA and 10% and 20% of fly ash at 7 and 28 days (0.50 w/b ratio). The results showed that the strength increase for reference concrete was equal to 7.69%, while for the concretes with fly ash the increase of compressive strength was approximately 35.12% and 49.8% higher. This behavior related to the increase of compressive strength when the fly ash is added was also observed in other similar studies [1, 13, 23].

3.2.2 Tensile strength (f_{tD})

Figure 6 shows the influence of fly ash in tensile strength for concretes with 25% of RCA in different ages (w/b ratios 0.40, 0.50, and 0.60).

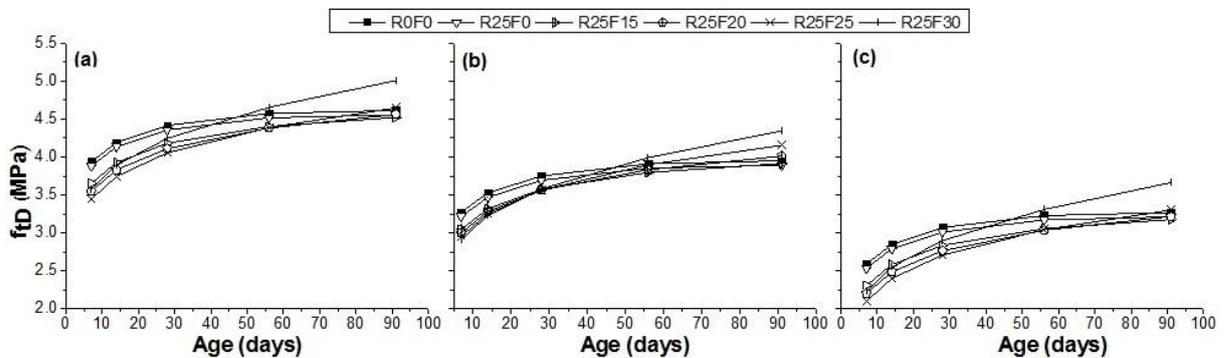


Figure 6: Influence of fly ash in concretes with RCA in tensile strength for concretes with 25% of RCA and w/b (a) 0.40; (b) 0.50; (c) 0.60.

It is possible to verify in figure 6(a) that the reference concrete (R0F0), up to 60 days of age, presented higher values of tensile strength. However, a decrease in those values with the RCA increase was also observed, mainly at early ages. This behavior is due to the concrete increased porosity due to the inherent porosity of RCA, directly influencing the tensile strength, as observed in compressive strength.

With the fly ash incorporation in concretes with RCA it is possible to observe lower tensile strength at 7 days (Figure 6(a)). However, with the age increase the tensile strength is more significantly increased in comparison to the concretes without RCA. The concretes R25F0, R25F20 and R25F30 presented values for tensile strength of 3.20 MPa, 3.21 MPa and 3.66 MPa respectively at 91 days (w/b ratio 0.60). The increased resistance in higher ages is attributed to the fly ash pozzolanic reaction and the possible porosity reduction due to the voids and macropores being filled up by fly ash particles [13, 44].

The w/b ratio influence over tensile strength is shown in Figure 7(a) and (b), at 28 and 91 days, respectively.

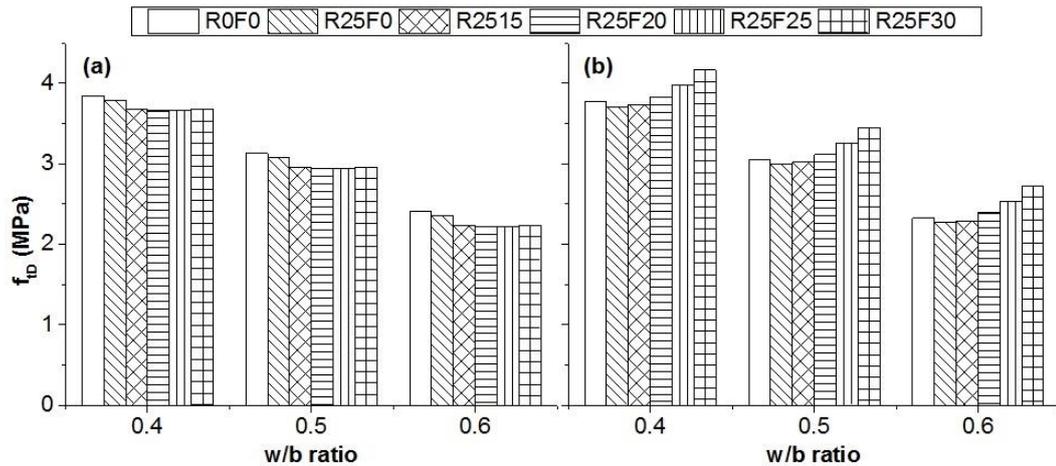


Figure 7: Influence of the w/b ratio in tensile strength in concretes with 25% of RCA: (a) 28 days; (b) 91 days.

It is observed in Figure 7(a) that the increase of the w/b ratio leads to a decrease in tensile strength for concretes R0F0 and R25F0, whose behavior is closely associated with the increase in the concrete porosity, due to the high porosity of the recycled aggregates [11, 67, 68]. Limbachiya et al. (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012) suggest that the tensile strength decrease in the concretes with RCA is attributed to the weak binding between the mass of hydrated cement and the RCA due to the former mortar bound to it.

In concrete R25F15 a drop in compressive strength can be verified in comparison to concrete R25F0: approximately 5% in w/b = 0.40 (Figure 7 (a)) at 28 days. And as there is an increase in the fly ash addition level, no significant minimization of the resistance was observed. When the w/b ratio is increased to 0.50 and 0.60, the resistance drop of concrete R25F15 was of approximately 28.35% and 70.03% respectively compared to concrete R25F0. At 91 days it is observed that fly ash replacement is increased the tensile strength increase for all the w/b ratios (Figure 7 (b)). High initial moisture may lower the early-age compressive strength but it would be beneficial for a continuous wet conditions and long term cement hydration, especially for PCFA concrete and hence, strength gain (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012).

3.3 Durability Parameters

3.3.1 Water absorption

In a general form, durability performance of concrete is a measure of permeation characteristics of materials, considering the integrity of concrete against aggressive environmental agents. In this way, the evaluation of water absorption is the first essential point to address when investigating the durability of concretes made with RCA. The results of water absorption for concretes at 28 days are presented in Figure 8.

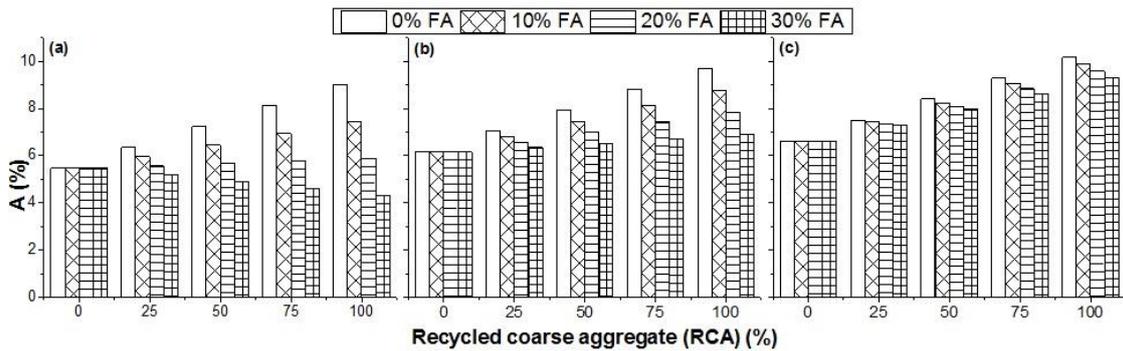


Figure 8: Absorption by immersion at 28 days for concretes investigated. Relação w/b (a) 0,40; (b) 0,50 e (c) 0,60. FA = fly ash.

Water absorption in concretes with RCA and no fly ash was larger than the reference concretes for all the w/b ratios evaluated. This behavior is associated to the porosity increase of concretes with RCA in function of the inherent porosity of RCA [3, 68]. Must be pointed out that water absorption of concretes also depends on the amount of adhered mortar on RCA particles.

The concretes with RCA and fly ash showed less water absorption than the concretes with residue and no fly ash. However as the w/b ratio increases the contents of RCA substitution in concretes with fly ash tend to be less significant. This positive effect from the fly ash in the concretes is associated with the refinement of the capillary pores, as previously described in several works [3, 15].

3.3.2 Carbonation Depth

In general the concretes with RCA have higher porosity than the reference ones, which allows for a higher CO₂ penetration. The RCA physical characteristic has a significant influence on carbonation process behavior, which tends to be non-uniform, as shown in Figures 9 and 10.

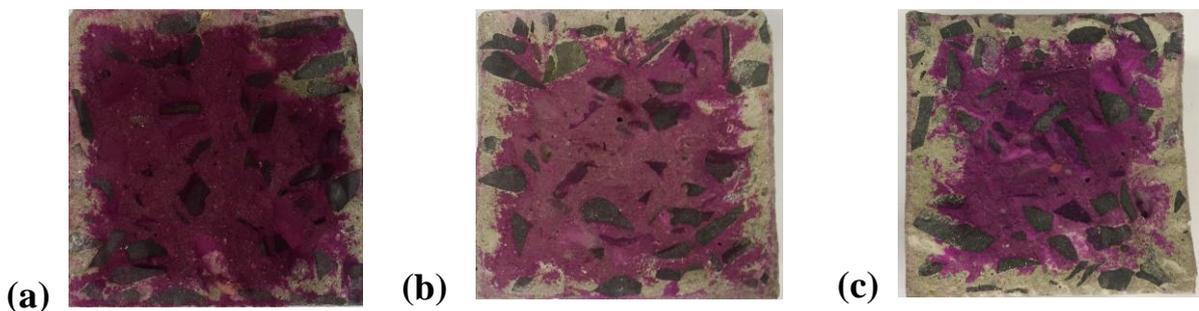


Figure 9: Carbonation of concrete R0F20 with w/b = 0.50: (a) 45 days; (b) 75; (c) 165 days

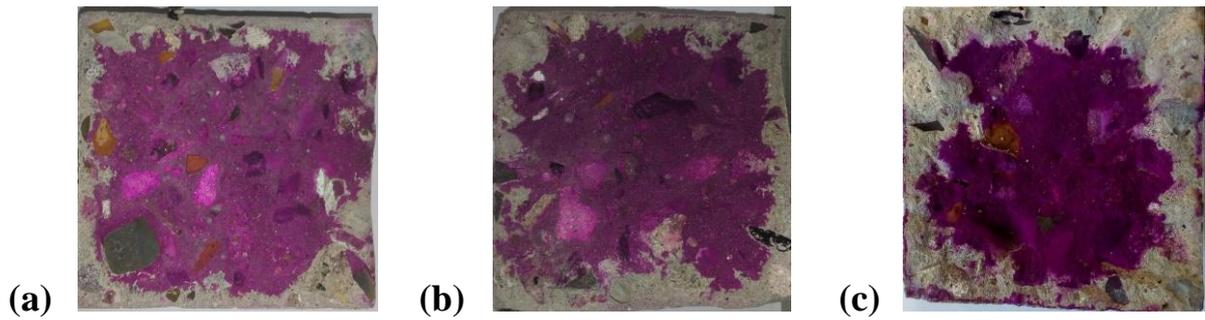


Figure 10: Carbonation of concrete R100F20 with w/b = 0.50: (a) 45 days; (b) 75; (c) 165 days

The results of carbonation depth (e_{CO_2}) regarding the investigated exposure period are presented in Figure 11.

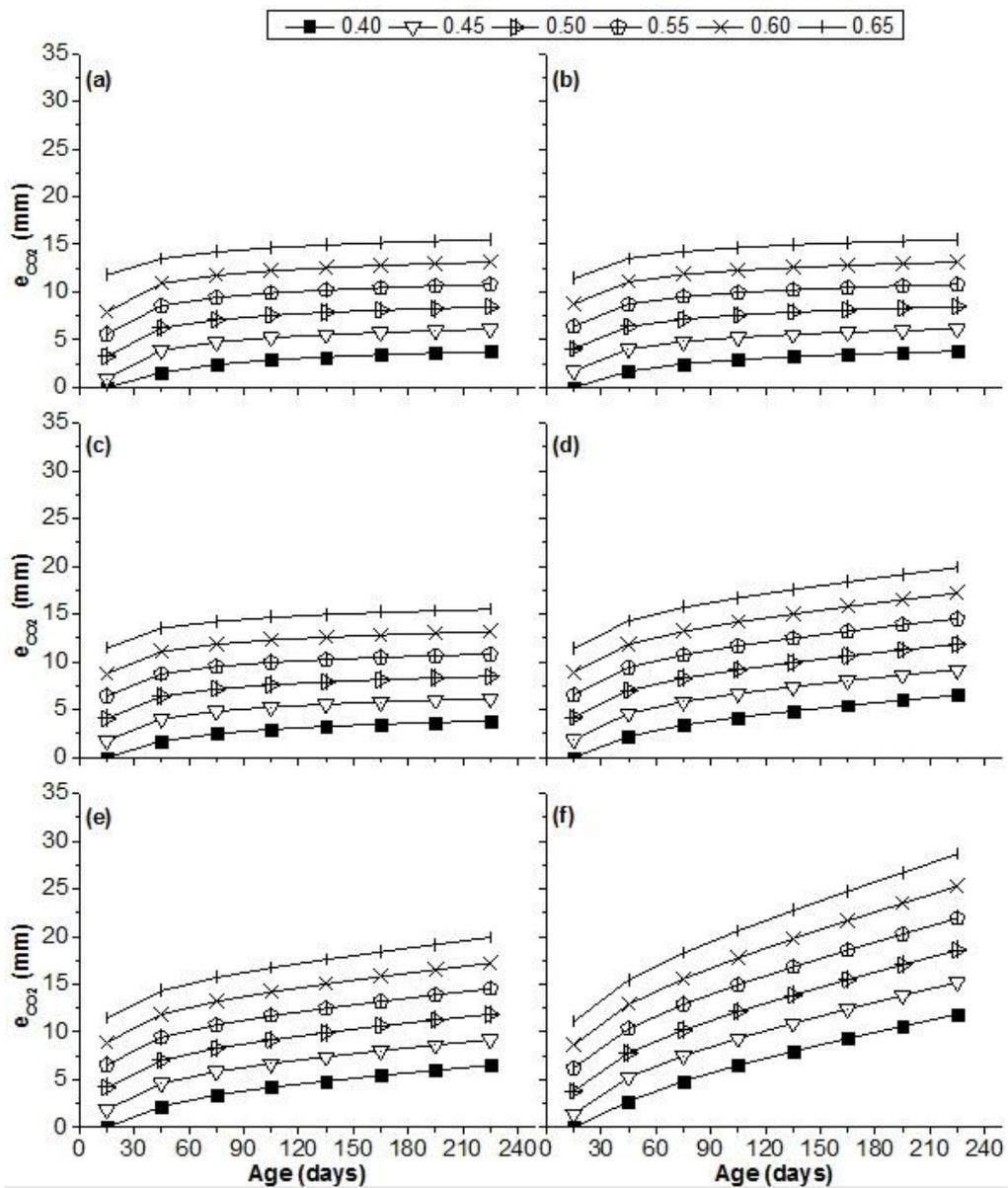


Figure 11: Carbonation depth in concretes over time: (a) R0F0; (b) R0F30; (c) R25F0; (d) R25F30; (e) R75F0; (f) R75F30.

Based on the results presented in Figure 11 it is observed that concretes R0F30 (Figure 11 (b)) and R25F0 (Figure 11 (c)) showed no significant differences in carbonation depth related to reference concrete (Figure 11 (a)) between 15 and 240 days of CO₂ exposure. Concretes R25F30 (Figure 11 (d)) and R75F30 (Figure 11 (f)) showed carbonation depths of 24.83% and 73.87% highest respectively compared to concrete R25F0 (Figure 11 (c)). This behavior may be related to the reduction of calcium hydroxide content, due to the minimization of cement content and the pozzolanic reaction of the fly ash, which dominates over the pores refinement, since there is a delay in the hydration process [9, 69]. Limbachiya et al. (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012) suggest that this behavior can be attributed to water being stored in the recycled aggregate, which is released during the hydration and thus contributes to the carbonation process. The authors observed in their results that the concretes R30F30, R100F30 exhibited carbonation depths 45.5% and 68.11% higher than reference, respectively. The results observed by Sideris et al. (SIDERIS; SAVVA; PAPAYIANNI, 2006) at 24 months in concrete R0F30 were approximately 40% higher in comparison to reference concrete.

The carbonation process is directly associated to the specimens' exposure time to CO₂. However, the carbonation coefficient tends to stabilize over time, being modeled through a square root model (SISOMPHON; FRANKE, 2007). This theory, according to Sisomphon e Franke (SISOMPHON; FRANKE, 2007), is based on Fick's second law, and can be represented by the Equation 6. Based on the experimental results, the carbonation coefficient (K) was determined through Equation 6, as already performed in other studies [3, 9, 69, 71].

$$X_c = K\sqrt{t}$$

Equation 6

Where; X_c = carbonation depth, in mm; K = Carbonation coefficient, in mm/month^{0.5}; t = exposure time, in months.

Figure 12 shows the relation between the carbonation coefficient and the exposure to CO₂ for concretes with w/b ratio equal to 0.50.

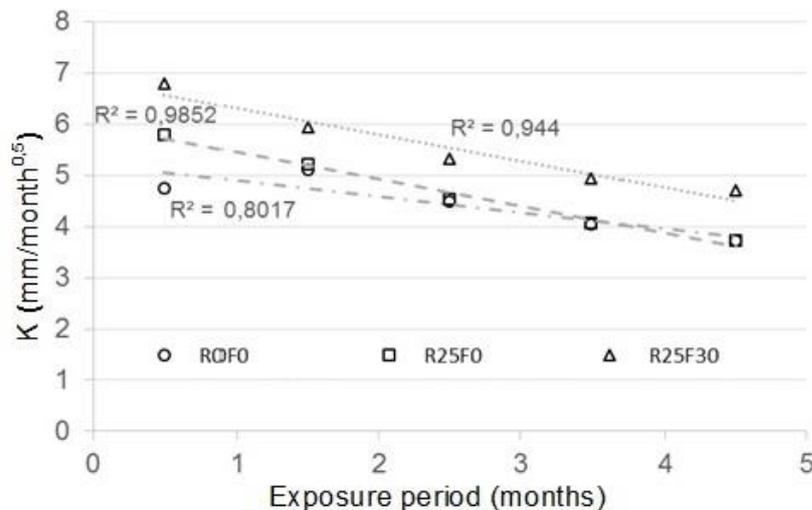


Figure 12: Relationship between K (mm/month^{0.5}) and t (months)

With the increase of exposure time, a reduction of the carbonation coefficient can be observed. The calcium carbonate resultant from carbonation process blocks partially the concrete pores network and reduces the gas diffusivity, and soon the carbonation coefficient tends to decrease as a function of time [3, 69]. However, it is possible to observe in Figure 12 that concrete R25F0 presents a carbonation coefficient (K) similar to the concrete R0F0. The results also show that the fly ash incorporation in concretes with 25% of RCA tends to increase the carbonation coefficient in the early ages of the concretes exposure to CO₂, but as the exposure time increases the carbonation coefficient tends to minimize. The values of drop of the concretes R0F0, R25F0 and R25F30 after 135 days of exposure were of 27.69% 55.22% and 44.46%, respectively. Limbachiya et al. (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012) observed reduction values for R0F0, R30F0 and R30F30 in the order of 21.42%, 44.68% and 32.43%, which are close to those found in this research.

Figure 13 shows the relation between the carbonation coefficient and the compressive strength at 28 days.

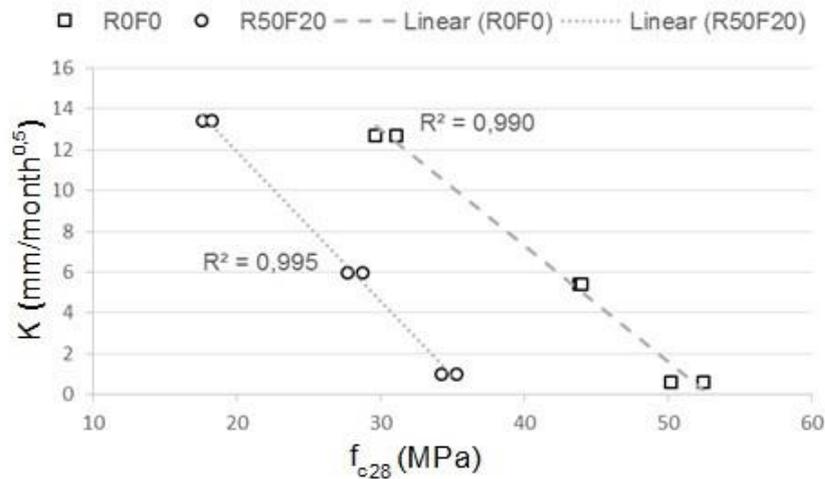


Figure 13: Relation between e_{CO_2} (mm) and f_c (MPa)

It is observed that the carbonation coefficient decreases as the compressive strength increases to concrete R0F0 as well as concrete R50F20. Khunthongkeaw et al. (KHUNTHONGKEAW; TANGTERMSIRIKUL; LEELAWAT, 2006) observed that the difference of the carbonation coefficient between the reference concrete and concretes with 10% of fly ash at 28 days, regarding to the compressive strength, was of approximately 10%. The data suggests that it is possible to estimate the concrete's carbonation depth from its compressive strength [3, 28].

4 CONCLUSIONS

This study investigated the synergic effect of RCA and fly ash in physical, mechanical and carbonation properties of concretes. Based on the results obtained the following conclusions may be drawn:

- The compressive strength of concretes with RCA and fly ash was significantly lower than at natural concrete at early ages. However, over time, the pozzolanic

reaction between the fly ash and the calcium hydroxide in concretes with RCA showed significant improvements in mechanical properties, tending to get closer to reference concretes in higher ages.

- The tensile strength of concretes at early ages was lower than reference concretes. However, the concretes with ages over 50 days presented tensile resistance superior to reference concrete.

- The use of fly ash as a replacement of Portland cement decreases water absorption in concretes with RCA. The concretes with 25% of recycled coarse aggregate and 30% of fly ash showed absorption rates very similar to the reference ones.

- Fly ash tends to decrease the carbonation coefficient at concretes with RCA as the time of exposure to CO₂ is increased. A strong correlation between the compressive strength and the carbonation coefficient was observed, in function of the more compact microstructure of concretes investigated.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was sponsor by Brazilian Research Supporting Agency (CAPES) for the grant to the first author. The authors are thankful to Jonas C. Delazeri, André G. dos Santos, Professors Filipe Zabala and Claudio L. C. Frankenberg. To the undergraduate students Nathalia Schmidt , Matheus Wenzel, Gabriela H. da Rocha, Denis M. Buselatto, Luana Schemmer, Dr. André L. M. Vargas, Gabriel C. S. Simioni, José E. Cruz, Douglas T. Rodeghiero and Civil Engineer Jeferson Webber.

References

- [1] A.N. Dabhade, S.R. Chaudari, A.R. Gajbhaye, Effect of Flyash on Recycle Coarse Aggregate Concrete, *Int. J. Civ. Eng. Res.* 5 (2014) 2278–3652. <http://www.ripublication.com/ijcer.htm>.
- [2] M. Behera, S.K. Bhattacharyya, a. K. Minocha, R. Deoliya, S. Maiti, Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review, *Constr. Build. Mater.* 68 (2014) 501–516. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003.
- [3] M. Limbachiya, M.S. Meddah, Y. Ouchagour, Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete, *Constr. Build. Mater.* 27 (2012) 439–449. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.023.
- [4] R. V. Silva, J. De Brito, R.K. Dhir, Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production, *Constr. Build. Mater.* 65 (2014) 201–217. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117.
- [5] P.K. Mehta, Reducing the environmental impact of concrete, *Concr. Int.* (2001) 61–66. doi:10.1016/S1351-4210(05)70693-4.
- [6] M.L. Berndt, Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 2606–2613. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.011.
- [7] E. Nazarimofrad, F.U.A. Shaikh, M. Nili, Effects of steel fibre and silica fume on impact behaviour of recycled aggregate concrete, *J. Sustain. Cem. Mater.* (2016). doi:10.1080/21650373.2016.1230900.

- [8] C.S. Poon, S.C. Kou, L. Lam, Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete, *Mater. Struct.* . 40 (2007) 981–988. doi:10.1617/s11527-006-9192-y.
- [9] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul, T. Leelawat, A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete, *Constr. Build. Mater.* 20 (2006) 744–753. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.01.052.
- [10] M. Bravo, J. de Brito, J. Pontes, L. Evangelista, Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants, *Constr. Build. Mater.* 77 (2015) 357–369. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103.
- [11] P.S. Lovato, E. Possan, D.C.C.D. Molin, Â.B. Masuero, J.L.D. Ribeiro, Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes, *Constr. Build. Mater.* 26 (2012) 437–447. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.043.
- [12] H. Dilbas, M. Şimşek, Ö. Çakır, An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume, *Constr. Build. Mater.* 61 (2014) 50–59. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.057.
- [13] S.C. Kou, C.S. Poon, D. Chan, Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete, *Mater. Struct.* 41 (2008) 1191–1201. doi:10.1617/s11527-007-9317-y.
- [14] M.N. Bajad, N. Mutha, H. Husain, N. Kshirsagar, Effect of Recycled Aggregate and Fly Ash in Concrete, *IOSR J. Mech. Civ. Eng. Ver. III.* 12 (2015) 2320–334. doi:10.9790/1684-12232835.
- [15] C. Lima, A. Caggiano, C. Faella, E. Martinelli, M. Pepe, R. Realfonzo, Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 547–559. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.04.051.
- [16] G.D. Moon, S. Oh, Y.C. Choi, Effects of the physicochemical properties of fly ash on the compressive strength of high-volume fly ash mortar, *Constr. Build. Mater.* 124 (2016) 1072–1080. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.148.
- [17] J. Payá, M. V. Borrachero, J. Monzó, E. Peris-Mora, M. Bonilla, Long term mechanical strength behaviour in fly ash/Portland cement mortars prepared using processed ashes, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 77 (2002) 336–344. doi:10.1002/jctb.580.
- [18] E. Sakai, S. Miyahara, S. Ohsawa, S.H. Lee, M. Daimon, Hydration of fly ash cement, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 1135–1140. doi:10.1016/j.cemconres.2004.09.008.
- [19] F.U.A. Shaikh, Effect of ultrafine fly ash on the properties of concretes containing construction and demolition wastes as coarse aggregates, *Struct. Concr.* 17 (2016) 116–122. doi:10.1002/suco.201500030.
- [20] P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong, V. Sirivivatnanon, Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 1087–1092. doi:10.1016/j.cemconres.2003.11.021.
- [21] K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, S. Songpiriyakij, S. Chutubtim, A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials, *Composites.* 23 (2001) 335–343.
- [22] C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, V. Sata, T. Leekeeratikul, Use of ground coarse fly ash as a replacement of condensed silica fume in producing high-strength concrete, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 549–555. doi:10.1016/S0008-8846(03)00150-9.
- [23] S.C. Kou, C.S. Poon, D. Chan, Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 19 (2007) 709–717. doi:10.1061/(Asce)0899-1561(2007)19:9(709).
- [24] K. Kim, M. Shin, S. Cha, Combined effects of recycled aggregate and fly ash towards concrete sustainability, *Constr. Build. Mater.* 48 (2013) 499–507. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.014.

- [25] M. Aboustait, T. Kim, M.T. Ley, J.M. Davis, Physical and chemical characteristics of fly ash using automated scanning electron microscopy, *Constr. Build. Mater.* 106 (2016) 1–10. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.098.
- [26] S.C. Kou, C.S. Poon, Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate, *Constr. Build. Mater.* 35 (2012) 69–76. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.032.
- [27] L. Zong, Z. Fei, S. Zhang, Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste, *J. Clean. Prod.* 70 (2014) 175–182. doi:10.1016/j.jclepro.2014.02.040.
- [28] C.D. Atiş, Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash, *Constr. Build. Mater.* 17 (2003) 147–152. doi:10.1016/S0950-0618(02)00116-2.
- [29] R. Somna, C. Jaturapitakkul, A.M. Amde, Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete, *Cem. Concr. Compos.* 34 (2012) 848–854. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.03.003.
- [30] W. Chalee, C. Jaturapitakkul, P. Chindaprasirt, Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater, *Mar. Struct.* 22 (2009) 341–353. doi:10.1016/j.marstruc.2008.12.001.
- [31] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, T. Sinsiri, Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 1534–1541. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.12.024.
- [32] K. De Weerd, M. Ben Haha, G. Le Saout, K.O. Kjellsen, H. Justnes, B. Lothenbach, Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 279–291. doi:10.1016/j.cemconres.2010.11.014.
- [33] V. Rahhal, R. Talero, Influence of two different fly ashes on the hydration of portland cements, *J. Therm. Anal. Calorim.* 78 (2004) 191–205. doi:10.1023/B:JTAN.0000042167.46181.17.
- [34] M. Cyr, P. Lawrence, E. Ringot, Mineral admixtures in mortars, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 719–730. doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.030.
- [35] E. Tkaczewska, Effect of size fraction and glass structure of siliceous fly ashes on fly ash cement hydration, *J. Ind. Eng. Chem.* 20 (2014) 315–321. doi:10.1016/j.jiec.2013.03.032.
- [36] N. Chousidis, I. Ioannou, E. Rakanta, C. Koutsodontis, G. Batis, Effect of fly ash chemical composition on the reinforcement corrosion, thermal diffusion and strength of blended cement concretes, *Constr. Build. Mater.* 126 (2016) 86–97. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.024.
- [37] M. Sufian Badar, K. Kupwade-Patil, S.A. Bernal, J.L. Provis, E.N. Allouche, Corrosion of steel bars induced by accelerated carbonation in low and high calcium fly ash geopolymer concretes, *Constr. Build. Mater.* 61 (2014) 79–89. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.03.015.
- [38] A.B.D.N.T. ABNT, Cimento Portland - Determinação da resistência a compressão, ABNT NBR 7215. (1996) 1–8.
- [39] A.B.D.N.T. ABNT, Agregados miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, ABNT NBR NM 52. (2009) 6p.
- [40] A.B.D.N.T. ABNT, Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, ABNT NBR NM 53. (2009) 8p.
- [41] A.B.D.N.T. ABNT, Agregado miúdo - Determinação da absorção de água, ABNT NBR NM 30. (2001) 3p.
- [42] A.B.D.N.T. ABNT, NBR-NM 45-2006 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.pdf, ABNT NBR NM 45. (2006) 8p.

- [43] A.B.D.N.T. ABNT, Agregados - Determinação da composição granulométrica, ABNT NBR NM 248. (2003) 6p.
- [44] S.C. Kou, C.S. Poon, Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash, *Cem. Concr. Compos.* 37 (2013) 12–19. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.12.011.
- [45] M.B. Leite, J.G.L. Figueire do Filho, P.R.L. Lima, Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate, *Mater. Struct.* 46 (2013) 1765–1778. doi:10.1617/s11527-012-0010-4.
- [46] M.I. Khan, C.J. Lynsdale, Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 123–131. doi:10.1016/S0008-8846(01)00641-X.
- [47] V. Calado, Planejamento de Experimentos usando o Statistica, E-Papers Servi{ç}os Editoriais, 2003. <https://books.google.com.br/books?id=1Yp7Q23dcLcC>.
- [48] D.C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments Eighth Edition, 8^o ed, 724p., Arizona, 2013.
- [49] P.R.L. Helene, P. Terzian, Manual de dosagem e controle do concreto, PINI, Pini, São Paulo, 1992. <https://books.google.com.br/books?id=0dHgAAAACAAJ>.
- [50] A.B.D.N.T. ABNT, Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, ABNT NBR 5738. (2015) 9p.
- [51] A.B.D.N.T. ABNT, Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos., ABNT NBR 5739. (2007) 9p.
- [52] A.B.D.N.T. ABNT, Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, ABNT NBR 7222. (2011) 5p.
- [53] A.B.D.N.T. ABNT, Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento, ABNT NBR 12655. (2015) 23p.
- [54] A.B.D.N.T. ABNT, Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, ABNT NBR 9778. (2005) 4p.
- [55] D. Xuan, B. Zhan, C.S. Poon, Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 65 (2016) 67–74. doi:10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018.
- [56] A. Morandea, M. Thiery, P. Dangla, Impact of accelerated carbonation on OPC cement paste blended with fly ash, *Cem. Concr. Res.* 67 (2015) 226–236. doi:10.1016/j.cemconres.2014.10.003.
- [57] C. Pauletti, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição, (2009).
- [58] M.P. Kulakowski, Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa, (2002) 199.
- [59] M.B. Leite, Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição, (2001) 270. doi:000292768.
- [60] S.C. Kou, C.S. Poon, H.W. Wan, Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 881–889. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.060.
- [61] S. Lotfi, M. Eggimann, E. Wagner, R. Mróz, J. Deja, Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology, *Constr. Build. Mater.* 95 (2015) 243–256. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.021.
- [62] C. Medina, W. Zhu, T. Howind, M.I. Sánchez De Rojas, M. Frías, Influence of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of recycled concrete, *J. Clean. Prod.* 68 (2014) 216–225. doi:10.1016/j.jclepro.2014.01.002.

- [63] X.-Y. Wang, K.-B. Park, Analysis of compressive strength development of concrete containing high volume fly ash, *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 810–819. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.099.
- [64] M. Pepe, R.D. Toledo Filho, E. a. B. Koenders, E. Martinelli, Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete, *Constr. Build. Mater.* 69 (2014) 124–132. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.084.
- [65] S. Ismail, M. Ramli, Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates, *Constr. Build. Mater.* 68 (2014) 726–739. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.058.
- [66] K. Erdoğan, P. Türker, Effects of fly ash particle size on strength of portland cement fly ash mortars, *Cem. Concr. Res.* 28 (1998) 1217–1222. doi:10.1016/S0008-8846(98)00116-1.
- [67] W.H. Kwan, M. Ramli, K.J. Kam, M.Z. Sulieman, Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties, *Constr. Build. Mater.* 26 (2012) 565–573. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.059.
- [68] C. Thomas, J. Setién, J.A. Polanco, P. Alaejos, M. Sánchez De Juan, Durability of recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 40 (2013) 1054–1065. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106.
- [69] K. Sisomphon, L. Franke, Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 1647–1653. doi:10.1016/j.cemconres.2007.08.014.
- [70] K.K. Sideris, A.E. Savva, J. Papayianni, Sulfate resistance and carbonation of plain and blended cements, *Cem. Concr. Compos.* 28 (2006) 47–56. doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.09.001.
- [71] P. Castro, M.A. Sanjuán, J. Genescá, Carbonation of concretes in the Mexican Gulf, *Build. Environ.* 35 (2000) 145–149. doi:10.1016/S0360-1323(99)00009-8.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste trabalho evidenciaram os efeitos que a cinza volante causa na propriedade mecânica (resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral) e de durabilidade (absorção d'água, profundidade de carbonatação) nos concretos. A resistência a compressão dos concretos com agregado graúdo reciclado e cinza volante foram significativamente menores que os concretos com agregados naturais nas primeiras idades. Porém, ao longo do tempo, a reação pozolânica entre a cinza volante e o hidróxido de cálcio, nos concretos com agregado graúdo reciclado, apresentaram melhoras nas propriedades mecânicas tendendo a se aproximar aos concretos de referência em maiores idades.

A resistências à tração por compressão diametral dos concretos com agregado graúdo reciclado e cinza volante em menores idades foram menores que os concretos naturais. Porém, os concretos com idades superiores a 50 dias de idade já apresentam resistências superiores aos do concreto de referência.

A adição de cinza volante em substituição ao cimento Portland atenua a absorção d'água nos concretos com agregado graúdo reciclado. Os concretos com 25% de agregado graúdo reciclado em substituição parcial ao agregado natural e 30% de adição de cinza volante em substituição ao cimento Portland em massa apresentaram taxa de absorção muito parecidas com os concretos de referência.

6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- O conhecimento do comportamento do desempenho mecânico e de durabilidade a longo prazo dos concretos com agregado reciclado graúdo de construção e demolição e cinza volante não é bem conhecido. Logo, mais pesquisas devem ser conduzidas nesta área.
- A análise microestrutural da zona de transição entre pasta e agregado nos concretos com RCD.
- Deve ser formulada uma proporção ótima de agregado graúdo reciclado e cinza volante em misturas de concreto, além do estabelecimento de um procedimento adequado de mistura.
- Embora os pesquisadores tenham investigado algumas propriedades de agregado reciclado de construção e demolição e cinza volante, estudos mais detalhados sobre a influência do tamanho das partículas de cinza volante nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos com agregado reciclado.

REFERÊNCIAS

- ABNT, A. B. D. N. T. Cimento Portland - Determinação da resistência a compressão. **ABNT NBR 7215**, p. 1–8, 1996.
- ABNT, A. B. D. N. T. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. **ABNT NBR NM 30**, p. 3p, 2001.
- ABNT, A. B. D. N. T. Agregados - Determinação da composição granulométrica. **ABNT NBR NM 248**, p. 6p, 2003.
- ABNT, A. B. D. N. T. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. **ABNT NBR 9778**, p. 4p, 2005.
- ABNT, A. B. D. N. T. NBR-NM 45-2006 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.pdf. **ABNT NBR NM 45**, p. 8p, 2006.
- ABNT, A. B. D. N. T. Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. **ABNT NBR 5739**, p. 9p, 2007.
- ABNT, A. B. D. N. T. Agregados miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. **ABNT NBR NM 52**, p. 6p, 2009a.
- ABNT, A. B. D. N. T. Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. **ABNT NBR NM 53**, p. 8p, 2009b.
- ABNT, A. B. D. N. T. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. **ABNT NBR 7222**, p. 5p, 2011.
- ABNT, A. B. D. N. T. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. **ABNT NBR 5738**, p. 9p, 2015a.
- ABNT, A. B. D. N. T. Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. **ABNT NBR 12655**, p. 23p, 2015b.
- ABOUSTAIT, M. et al. Physical and chemical characteristics of fly ash using automated scanning electron microscopy. **Construction and Building Materials**, Munich, v. 106, p. 195–203, December, 2013.
- APRIANTI, E. et al. Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes - A review. **Construction and Building Materials**, Malaiya, v. 74, p. 176–187, November, 2015.
- ATIŞ, C. D. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. **Construction and Building Materials**, Balcali, v. 17, n. 3, p. 147–152, October, 2003.
- BAJAD, M. N. et al. Effect of Recycled Aggregate and Fly Ash in Concrete. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering Ver. III**, Maharashtra v. 12, n. 2, p.

2320–334, Mar/Apr 2015.

BEHERA, M. et al. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials**, Roorkee, v. 68, p. 501–516, July, 2014.

BERNDT, M. L. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, Victoria, v. 23, n. 7, p. 2606–2613, March, 2009.

BRAVO, M. et al. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. **Construction and Building Materials**, Lisbon, v. 77, p. 357–369, January, 2015.

CALADO, V. **Planejamento de Experimentos usando o Statistica**. 1 ed. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2003.

CASTRO, P.; SANJUÁN, M. A.; GENESCÁ, J. Carbonation of concretes in the Mexican Gulf. **Building and Environment**, Yucatán, v. 35, n. 2, p. 145–149, January, 2000.

CHALEE, W.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. **Marine Structures**, Chomburi, v. 22, n. 3, p. 341–353, December, 2009.

CHINDAPRASIRT, P.; HOMWUTTIWONG, S.; SIRIVIVATNANON, V. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. **Cement and Concrete Research**, Khon Kaen, v. 34, n. 7, p. 1087–1092, November, 2004.

CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C.; SINSIRI, T. Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. **Construction and Building Materials**, Khon Kaen, v. 21, n. 7, p. 1534–1541, October, 2007.

CHOUSIDIS, N. et al. Effect of fly ash chemical composition on the reinforcement corrosion, thermal diffusion and strength of blended cement concretes. **Construction and Building Materials**, Athens, v. 126, p. 86–97, September, 2016.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars. **Cement and Concrete Research**, Toulouse, v. 35, n. 4, p. 719–730, May, 2005.

DABHADE, A. N.; CHAUDARI, S. R.; GAJBHAYE, A. R. Effect of Flyash on Recycle Coarse Aggregate Concrete. **International Journal of Civil Engineering Research**, Maharashtra, v. 5, n. 1, p. 2278–3652, 2014.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 2 ed. São Paulo Editora IBRACON, 2011.

DE WEERDT, K. et al. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. **Cement and Concrete Research**, Trondheim, v. 41, n. 3, p. 279–291, November, 2011.

DILBAS, H.; ŞİMŞEK, M.; ÇAKIR, Ö. An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. **Construction and Building Materials**, Istanbul, v. 61, n. March 2006, p. 50–59, March, 2014.

ERDOĞDU, K.; TÜRKER, P. Effects of fly ash particle size on strength of portland cement fly ash mortars. **Cement and Concrete Research**, Ankara, v. 28, n. 9, p. 1217–1222, July, 1998.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1 ed., São Paulo, Editora Pini, 1992.

ISMAIL, S.; RAMLI, M. Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, Pulau Pinang, v. 68, p. 726–739, July, 2014.

JATURAPITAKKUL, C. et al. Use of ground coarse fly ash as a replacement of condensed silica fume in producing high-strength concrete. **Cement and Concrete Research**, Bangkok, v. 34, n. 4, p. 549–555, April, 2004.

KHAN, M. I.; LYNSDALE, C. J. Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, Nottingham, v. 32, n. 1, p. 123–131, July, 2002.

KHUNTHONGKEAW, J.; TANGTERMSIRIKUL, S.; LEELAWAT, T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. **Construction and Building Materials**, Patumthani, v. 20, n. 9, p. 744–753, March, 2006.

KIATTIKOMOL, K. et al. A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials. **Cement & Concrete Composites**, v. 23, p. 335–343, March, 2001.

KIM, K.; SHIN, M.; CHA, S. Combined effects of recycled aggregate and fly ash towards concrete sustainability. **Construction and Building Materials**, Ulsan, v. 48, p. 499–507, August, 2013.

KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. **Keele, UK, Keele University**, Staffs, v. 33, n. TR/SE-0401, p. 28, July, 2004.

KOU, S. C. et al. PROPERTIES OF STEAM CURED RECYCLED AGGREGATE FLY ASH CONCRETE. **International RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures, Barcelona**, Hong Kong, n. 1, p. 590–599, 2004. ,

KOU, S. C.; POON, C. S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, Hong Kong, v. 35, p. 69–76, April, 2012.

KOU, S. C.; POON, C. S. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. **Cement and Concrete Composites**, Hong Kong, v. 37, n. 1, p. 12–19, December, 2013.

KOU, S. C.; POON, C. S.; CHAN, D. Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Hong Kong, v. 19, n. 9, p. 709–717, Juny, 2007.

KOU, S. C.; POON, C. S.; CHAN, D. Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete. **Materials and Structures**, Hong Kong, v. 41, n. 7, p. 1191–1201, October, 2008.

KOU, S. C.; POON, C. S.; WAN, H. W. Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, Hong Kong, v. 36, p. 881–889, April, 2012.

KULAKOWSKI, M. P. Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa. 2002. 199 p., Trabalho de conclusão de curso (Tese) - Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2002.

KWAN, W. H. et al. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. **Construction and Building Materials**, Pulau Pinang, v. 26, n. 1, p. 565–573, July, 2012.

LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2001. 270 p., Trabalho de conclusão de curso (Tese) - Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2001.

LEITE, M. B.; FIGUEIRE DO FILHO, J. G. L.; LIMA, P. R. L. Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate. **Materials and Structures**, Feira de Santana, v. 46, p. 1765–1778, January, 2013.

LEITE, M. B.; MONTEIRO, P. J. M. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. **Cement and Concrete Research**, Feira de Santana, v. 81, n. November, p. 38–48, November, 2016.

LEVY, Y.; ELLIS, T. J. A systems approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. **Informing Science**, Florida, v. 9, p. 181–211, 2006.

LIMA, C. et al. Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash. **Construction and Building Materials**, Salerno, v. 47, p. 547–559, June, 2013.

LIMBACHIYA, M. C.; MARROCCHINO, E.; KOULOURIS, A. Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. **Waste Management**, Thames, v. 27, n. 2, p. 201–208p, March, 2007.

LIMBACHIYA, M.; MEDDAH, M. S.; OUCHAGOUR, Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**, London, v. 27, n. 1, p. 439–449, September, 2012.

LOTFI, S. et al. Performance of recycled aggregate concrete based on a new

concrete recycling technology. **Construction and Building Materials**, Krakow, v. 95, p. 243–256, July, 2015.

LOVATO, P. S. et al. Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. **Construction and Building Materials**, Rio Grande do Sul, v. 26, n. 1, p. 437–447, July, 2012.

MATIAS, D. et al. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates - Influence of the use of superplasticizers. **Construction and Building Materials**, Lisbon, v. 44, p. 101–109, April, 2013.

MEDDAH, M. S. Recycled aggregates in **concrete production**: engineering properties and environmental impact. Oman: 2017

MEDINA, C. et al. Influence of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, Cáceres, v. 68, p. 216–225, January, 2014.

MEHTA, P. K. Reducing the environmental impact of concrete. **Concrete International**, October, p. 61–66, 2001.

METHA, P.K., MONTEIRO, P. J. . In: *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*, São Paulo, Editora IBRACOM, 2008

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

MOHAMMADINIA, A. et al. Strength Development and Microfabric Structure of Construction and Demolition Aggregates Stabilized with Fly Ash – Based Geopolymers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Hawthorn, v. 28, n. 11, p. 1–8, 2015.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments* Eighth Edition, 8. ed. Arizona: 724p., 2013.

MOON, G. D.; OH, S.; CHOI, Y. C. Effects of the physicochemical properties of fly ash on the compressive strength of high-volume fly ash mortar. **Construction and Building Materials**, Seoul, v. 124, p. 1072–1080, September, 2016.

MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. Impact of accelerated carbonation on OPC cement paste blended with fly ash. **Cement and Concrete Research**, Princeton, v. 67, p. 226–236, October, 2015.

NAZARIMOFRAD, E.; SHAIKH, F. U. A.; NILI, M. Effects of steel fibre and silica fume on impact behaviour of recycled aggregate concrete. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, Perth, ISSN: 2165-0373, October, 2016.

BRASIL. Resolução Normativa nº. 129/2004, DE 15 de junho de 2011. **reembolso de combustíveis para centrais termelétricas**. Nota Técnica: Edição Federal, São Paulo, Processo nº: 48500.002263/2011-18, 2011.

PAULETTI, C. **Estimativa da Carbonata natural de materiais cimentícios a partir**

de ensaios acelerados e de modelos de predição. 2009. 281 p. Trabalho de conclusão de curso (Tese) - Engenharia Civil, UFGRS, Porto Alegre, 2009..

PAYÁ, J. et al. Long term mechanical strength behaviour in fly ash/Portland cement mortars prepared using processed ashes. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, Valencia, v. 77, n. 3, p. 336–344, June, 2002.

PEPE, M. et al. Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. **Construction and Building Materials**, Fisciano, v. 69, p. 124–132, August, 2014.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. **Materials and Structures**, Hong Kong, v. 40, n. 9, p. 981–988, October, 2007.

RAHHAL, V.; TALERO, R. Influence of two different fly ashes on the hydration of portland cements. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 78, n. 1, p. 191–205, 2004.

SAKAI, E. et al. Hydration of fly ash cement. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1135–1140, 2005.

SHAIKH, F. U. A. Effect of ultrafine fly ash on the properties of concretes containing construction and demolition wastes as coarse aggregates. **Structural Concrete**, Olavarría, v. 17, n. 1, p. 116–122, May, 2016.

SIDERIS, K. K.; SAVVA, A. E.; PAPAYIANNI, J. Sulfate resistance and carbonation of plain and blended cements. **Cement and Concrete Composites**, Xanthi, v. 28, n. 1, p. 47–56, August, 2006.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, Lisbon, v. 65, p. 201–217, May, 2014.

SIM, J.; PARK, C. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. **Waste Management**, Ansan, v. 31, n. 11, p. 2352–2360, July, 2011.

SISOMPHON, K.; FRANKE, L. Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. **Cement and Concrete Research**, Hamburg, v. 37, n. 12, p. 1647–1653, August, 2007.

SOMNA, R.; JATURAPITAKKUL, C.; AMDE, A. M. Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, Bangkok, v. 34, n. 7, p. 848–854, March, 2012.

SUFIAN BADAR, M. et al. Corrosion of steel bars induced by accelerated carbonation in low and high calcium fly ash geopolymer concretes. **Construction and Building Materials**, Ruston, v. 61, p. 79–89, March, 2014.

THOMAS, C. et al. Durability of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, Santander, v. 40, p. 1054–1065, December, 2013.

TKACZEWSKA, E. Effect of size fraction and glass structure of siliceous fly ashes on fly ash cement hydration. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Krakow, v. 20, n. 1, p. 315–321, April, 2014.

WANG, X.-Y.; PARK, K.-B. Analysis of compressive strength development of concrete containing high volume fly ash. **Construction and Building Materials**, Chuncheon, v. 98, p. 810–819, September, 2015.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, Kowloon, v. 65, p. 67–74, October, 2016.

ZONG, L.; FEI, Z.; ZHANG, S. Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste. **Journal of Cleaner Production**, Nanjing, v. 70, p. 175–182, February, 2014.

ANEXO A - SUBMISSÃO DO ARTIGO

Construction & Building Materials

Title: INVESTIGATION OF CARBONATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETES WITH CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE AND FLY ASH

Authors: Sergio Roberto da Silva, Eng.

Dear SERGIO ROBERTO,

The PDF for your submission, "INVESTIGATION OF CARBONATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETES WITH CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE AND FLY ASH" has now been built and is ready for your approval. Please view the submission before approving it, to be certain that it is free of any errors. If you have already approved the PDF of your submission, this e-mail can be ignored.

To approve the PDF please login to the Elsevier Editorial System as an Author:

<https://ees.elsevier.com/conbuildmat/>

Your username is: sergio.roberto@acad.pucrs.br

Then click on the folder 'Submissions Waiting for Author's Approval' to view and approve the PDF of your submission. You may need to click on 'Action Links' to expand your Action Links menu.

You will also need to confirm that you have read and agree with the Elsevier Ethics in Publishing statement before the submission process can be completed. Once all of the above steps are done, you will receive an e-mail confirming receipt of your submission from the Editorial Office. For further information or if you have trouble completing these steps please go to: http://help.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/88/p/7923.

Please note that you are required to ensure everything appears appropriately in PDF and no change can be made after approving a submission. If you have any trouble with the generated PDF or completing these steps please go to: http://help.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/88/p/7923.

Your submission will be given a reference number once an Editor has been assigned to handle it.

Thank you for your time and patience.

Kind regards,

Editorial Office

Construction & Building Materials

For further assistance, please visit our customer support site

at <http://help.elsevier.com/app/answers/list/p/7923>. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions and learn more about EES via interactive tutorials. You will also find our 24/7 support contact details should you need any further assistance from one of our customer support representatives.