

Propriedades Mecânicas de Concretos com o uso de Agregados Residuais

Mechanical Properties of Concrete Using Residual Aggregates

Cristiane Carine dos Santos(1); Geraldo Cechella Isaia(2); Denise Carpena Coitinho Dal Molin(3)

1 Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.

E-mail: cristianecdossantos@hotmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0988-2682>

2 Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.

E-mail: geraldoisaia@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0653-1227>

3 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

E-mail: dmolin@ufrgs.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1934-7533>

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 7, n. 1, p. 104-120, Janeiro-Junho 2020 - ISSN 2358-6508

[Recebido: Julho 24, 2019; Aceito: Maio 28, 2020]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2020.v7i1.3442>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editora: Aline Zanchet

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

Com o crescente aumento do consumo dos recursos naturais em nível mundial, geram-se grandes preocupações em relação ao meio ambiente, tornando a sustentabilidade um assunto em destaque quanto à qualidade de vida e a sobrevivência dos seres vivos. A presente pesquisa visa analisar misturas de concreto com agregado residual de construção e demolição (RCD) através dos ensaios de resistência à compressão axial. Os concretos estudados foram moldados com substituição de dois teores de agregado residual, ou seja, substituições de 15 e 30% do agregado graúdo por RCD, o cimento também foi substituído parcialmente por dois tipos de pozolanas em misturas binárias e ternárias, em que se realizaram substituições de 25% de cimento por cinza de casca de arroz (CCA) e 25% de cinza volante CV para as misturas binárias, já para as ternárias os teores de substituições foram de (15+10)% (CCA+CV). Para os ensaios de resistência á compressão axial foram moldados corpos de prova cilíndricos de dimensão 10x20cm e curados em câmara úmida por um período de 28 dias. Através dos resultados pôde-se perceber que em relação ao traço referência (sem substituições), os concretos com pozolanas, tanto em misturas binárias como ternárias obtiveram resistência à compressão axial bem próximos do referência, já os traços moldados com substituições somente de agregados resultaram em resistência à compressão axial bastante inferiores. No entanto, concluiu-se que em relação à resistência à compressão axial é viável a utilização de RCD em concretos, porém quando da utilização de pozolanas na mistura.

Palavras-chave: Concreto. Material pozzolânico. Resistência à compressão axial.

Abstract

With the increasing consumption of natural resources worldwide, there are great concerns about the environment, making sustainability a prominent issue regarding the quality of life and survival of living beings. This research aims to analyze concrete mixtures with construction and demolition (RCD) through axial compressive strength tests. The concretes studied were molded with substitution of two contents of residual aggregate, ie substitutions of 15 and 30% of the coarse aggregate by RCD, the cement was also partially replaced by two pozzolans in binary and ternary mixtures, in which they were made. substitutions of 25% of cement by rice husk ash (CCA) and 25% of fly ash CV) for binary mixtures, while for ternary substitutions levels were (15 + 10)% (CCA + CV). For the tests of resistance to axial compression were molded cylindrical specimens of dimension 10x20cm and cured in a humid chamber for a period of 28 days. Through the results it could be seen that in relation to the reference trait (without substitutions), the pozzolan concretes, in both binary and ternary mixtures, obtained resistance to axial compression very close to the reference, whereas the molded traces with substitutions of aggregates only resulted in much lower axial compressive strength. However, it was concluded that in relation to the axial compressive strength the use of RCD in concrete is feasible, but when using pozzolans in the mixture.

Keywords: Concrete. Pozzolanic material. Resistance to axial compression.

1 Introdução

A construção civil deverá crescer cerca de 2,5 vezes em relação ao nível mundial até o ano de 2050 (AGOPYAN; JOHN, 2011), destacando-se neste cenário o grande consumo de cimento, agregados naturais e, conseqüentemente, de concreto. Este ciclo de crescimento resultará em problemas ambientais, tais como, o aquecimento global, poluição do ar, da água e dos solos, destruição de ecossistemas e esgotamento de recursos naturais.

A produção mundial de cimento é responsável por, aproximadamente, de 5% a 8% das emissões de gás carbônico (CO₂) antropogênico (CEMBUREAU, 2013; IPCC, 2014), superando o consumo de alimentos, o que dá a dimensão do seu enorme consumo como material de construção para todo e qualquer ambiente construído. Além disso, com o crescente esgotamento dos agregados naturais, em grandes metrópoles os mesmos são transportados de locais cada vez mais distantes, originando gastos e poluição adicional devido ao custo do frete e exalação de CO₂ pela queima de combustíveis fósseis pelos caminhões.

Então, sabendo-se das propriedades do concreto, tais como, durabilidade, segurança estrutural e boa resistência ao fogo, uma boa possibilidade que o mesmo proporciona é a substituição parcial do cimento por pozolanas, contribuindo com uma possível redução do dióxido de carbono (CO₂) liberado no processo produtivo do clínquer e a diminuição dos descartes indevidos (John, 2010). Também possibilita a substituição parcial do agregado graúdo natural por agregado graúdo proveniente de resíduos de construção e demolição (RCD), diminuindo a exploração e o consumo dos agregados naturais, bem como, a redução dos descartes impróprios.

Em virtude destes aspectos e visando a aplicação das pozolanas alternativas, como a cinza de casca de arroz e a cinza volante e dos resíduos de concreto em novas estruturas de concreto armado, este estudo pretende contribuir com a sociedade, além, de trazer benefícios ao meio ambiente através de conhecimentos teóricos e práticos aplicados. O objetivo principal deste trabalho é verificar a eficiência do concreto estrutural, através dos resultados de resistência a compressão axial, substituindo parcialmente o agregado graúdo natural por agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD), bem como, a substituição parcial do cimento por dois tipos de pozolanas, cinza volante e cinza de casca de arroz.

2 Concreto e Sustentabilidade: Reciclagem de resíduos

2.1 Resíduos de Construção e Demolição

A indústria da construção civil é um dos setores mais importantes para o desenvolvimento econômico e social de um país, até o ano de 2014 o setor da

construção civil vinha crescendo e se fortalecendo economicamente de modo considerável e equilibrado. Neves (2014) explica que impulsionado pelas obras da Copa do Mundo e pelo ano eleitoral acreditava-se que o PIB do setor chegasse a 2,8% e o crescimento do país a 2%. Porém, desde 2014 o Brasil se encontra em uma crise econômica severa, onde o PIB do país e da construção civil apresenta dificuldades de crescimento do ano de 2014 até 2018, considerando o peso da construção civil nos investimentos do país, uma recuperação da economia resulta no reaquecimento nas atividades do setor. Por sua vez, este setor gera consideráveis impactos ambientais, tanto pelo consumo de recursos naturais, como pela geração de resíduos. Para minimizar os problemas causados pela construção civil, tem-se como alternativa a reutilização ou reciclagem dos rejeitos, que apesar desses procedimentos terem começado na Europa depois da Segunda Guerra Mundial, no Brasil ainda encontram-se em atraso, mesmo com os problemas de escassez das áreas para aterros, principalmente em regiões metropolitanas (MEDEIROS et al., 2003).

Os resíduos gerados pela construção civil são definidos pela resolução do CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002); CONAMA 348 (BRASIL, 2004); CONAMA nº448 (BRASIL, 2012) e pela NBR 15113 - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação (ABNT, 2004) como resíduos provenientes de construções, reparos, reformas e demolições, consequentes de escavações de terrenos, como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, tintas, colas, madeiras, compensados, gesso, forros, argamassas, telhas, pavimentos asfálticos, plásticos, tubulações, entre outros; que são usualmente denominados entulhos de obra, calça ou metralha. No entanto, os resíduos provenientes de construção e demolição (RCD) são gerados durante todo o processo de construção, e conforme Ângulo (2005) são responsáveis por 50% do total de resíduos sólidos urbanos (RSU) que são produzidos pela população.

Pesquisas apontam que existe um aumento acelerado na geração de RCD, pois com o crescimento da população necessitam-se quantidades maiores de infraestruturas. Conforme a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2014) foram coletados pelos municípios brasileiros no ano de 2014 cerca de 45 milhões de toneladas de RCD, apresentando um aumento de 4,1% em relação ao ano anterior.

2.2 Pozolanas

Nos últimos anos a indústria da construção civil tem buscado, de maneira constante e bastante insistente, a utilização de materiais alternativos com o objetivo de atender aos requisitos para o desenvolvimento sustentável. Entre esses materiais destacam-se as pozolanas, que são definidas pela NBR 12653 (ABNT, 2015) como materiais silicosos ou silicoaluminosos, que possuem pouca ou nenhuma atividade

aglomerante, mas quando divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

Segundo Isaia, Furquim e Gastaldini (2009), quando se substitui parte de cimento por adições minerais, cada tipo atua de modo distinto, de acordo com a finura, atividade química, física ou ainda quantidade na mistura, tendo em vista que esses fatores proporcionam diferentes interações com a pasta. Alterações do tipo ou teor da adição mineral e da relação água/aglomerante (a/ag), bem como, condições de cura, influem na microestrutura dessas pastas e resultam em comportamento mecânico e de durabilidade distintos, o que acaba por afetar a eficiência da microestrutura como um todo.

Entre os diversos tipos de materiais pozolânicos, a CV e a CCA são alguns dos subprodutos cada vez mais estudados e utilizados nas últimas décadas, tendo como propósito tentar reduzir os impactos ocasionados ao meio ambiente e ao mesmo tempo melhorar as propriedades do concreto, pois existem inúmeras pesquisas que apontam a viabilidade de substituir-se parcialmente o cimento por estes subprodutos agroindustriais.

Existem inúmeros efeitos ocasionados pelas pozolanas altamente reativas como, sílica ativa, cinza de casca de arroz, cinza volante, entre outras, quando adicionadas ao concreto, e conforme Mehta e Monteiro (2008) esses acontecimentos ocorrem devido às características das partículas. Um dos efeitos causados é o microflier que está relacionado ao aumento da densidade da mistura ocasionado pelo tamponamento dos poros causado pelas pequenas partículas das pozolanas. O segundo efeito citado pelos autores é o efeito da reação pozolânica, sendo que a sílica amorfa que está presente nas pozolanas altamente reativas consome ácido clorídrico (CH), promovendo a alteração da microestrutura da zona de transição da pasta com o agregado, resultando em uma interface menos porosa e mais uniforme, melhorando assim, as propriedades do concreto. A cinza volante é um subproduto proveniente da queima do carvão mineral utilizado em usinas termelétricas para geração de energia e contém altos teores de sílica e alumina. Segundo Pires (2002), uma parte da cinza volante é formada pelas inclusões minerais do carvão precursor que ficam expostas após o desprendimento dos voláteis e o consumo do carbono, a uma temperatura entre 1100 e 1300 °C, e fundem formando pequenas gotículas que, por sua vez, formam gotículas maiores. Rocha Junior (2011) acrescenta que a parte restante é formada a partir de componentes não combustíveis e partículas de carvão não queimado.

Segundo a ASTM C618, as cinzas volantes são classificadas em Classe C e Classe F. A cinza volante é um complexo material formado pela combinação de fases amorfas ou vítreas (60-90%) e fases cristalinas. Estas cinzas são compostas principalmente por silicatos (SiO_2 , 35-60%), alumina (Al_2O_3 , 10-30%), óxidos de ferro (Fe_2O_3 , 4-20%) e de cálcio (CaO, 1-35%). Quando a soma dos teores de sílica, alumina e óxido de ferro forem superiores a 70%, a cinza volante é classificada como de Classe F. Na cinza

volante de Classe C esta soma precisa ser superior a 50%. Geralmente as cinzas de Classe C possuem teor de CaO maior que 20% (ACI 232.2R, 1996).

A cinza da casca de arroz é um resíduo agroindustrial, resultante da combustão da casca de arroz, geralmente usada pelas indústrias beneficiadoras de arroz como combustível na geração de calor necessário no processo de secagem dos grãos. Mehta e Monteiro (2014) citam que a CCA corresponde a 20% do volume de casca de arroz e é um material leve, com porosidade interna.

Em relação a sua composição química, Mehta e Monteiro (2014) descrevem que a casca do arroz possui alto teor de sílica, composta de aproximadamente 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra. A lignina e a celulose são removidas durante a queima, resultando numa estrutura celular porosa. O tamanho das partículas da CCA, juntamente com as condições de queima, é um dos fatores que influenciam nas características pozolânicas das CCAs. A moagem é uma operação necessária, capaz de modificar as propriedades físicas da cinza da casca de arroz, tais como a superfície específica e finura.

Logo, a possibilidade de incorporação dessas adições no ramo da construção civil, além de proporcionar melhorias nas propriedades do concreto, contribui diretamente na diminuição da exploração de minerais não renováveis, como também na redução dos problemas causados pela forma como são tratados esses rejeitos, ocupando um papel ecologicamente correto. Para amenizar o impacto ambiental e econômico da fabricação do cimento, as adições minerais têm se mostrado uma alternativa viável e eficiente para a substituição parcial do clínquer, visto que grande parte dessas adições é formada por resíduos agroindustriais e subprodutos industriais.

3 Metodologia Experimental

Este item apresenta a metodologia aplicada para a confecção dos corpos de prova de concreto empregados na pesquisa, bem como, a caracterização dos materiais utilizados e os procedimentos para produção das misturas e amostras.

Posteriormente é apresentado o método de execução do ensaio com o objetivo de determinar o comportamento dos concretos com substituição em comparação ao concreto de referência, através do ensaio de Resistência a Compressão Axial, NBR 5739 (ABNT, 2018), tendo em vista que, a eficiência, durabilidade e sustentabilidade das estruturas de concreto estão diretamente ligadas com a sua capacidade de resistir a cargas de compressão, não apresentando deformações exageradas ou desproporcionais. Para a moldagem dos corpos de prova baseou-se na ABNT NBR 5738 (2016).

Através do processo de análise experimental, e da escolha de variáveis e condições que determinam os experimentos, observaram-se os efeitos que as mudanças causadas pelas variáveis de estudo geraram em comparação com as de referência.

3.1 Caracterização dos Materiais

Realizou-se uma análise das propriedades físicas e químicas dos materiais, tendo em vista que, conforme Mehta e Monteiro (2014), antes de fazer uma mistura de concreto, a seleção dos materiais componentes realizados metodicamente é o primeiro passo para se obter um produto que realmente tenha representatividade nos resultados.

3.1.1 Materiais Cimentícios

Utilizou-se o cimento Portland CP V-ARI da marca Itambé, nacional, conforme a norma NBR 5733 (ABNT, 1991). E como substituição parcial do cimento a cinza de casca de arroz (CCA) proveniente da região de Santa Maria – RS, e a cinza volante (CV), proveniente da usina termoeletrica de Candiota, ambas foram moídas durante 1 hora em moinho de bolas. Na Tabela 01 estão representadas as características físicas dos materiais cimentícios e a composição química pode ser observada na Tabela 02.

Tabela 01 – Características físicas dos materiais cimentícios

CARACTERÍSTICAS	IDADE - DIAS	CPV-ARI	CCA	CV
Índice de Finura #0,075 mm (% retida)		0,02	4,97	2,11
Área específica BET (m ² /g)		5,96	18,71	3,55
Consistência normal (%)		29,1	-	-
Massa específica (g/cm ³)		3,14	2,09	2,19
Argamassa normal - Resistência à compressão axial (MPa)	3	38,1	-	-
	7	38,6	-	-
	28	50	-	-
Início de pega (min)		154	-	-
Fim de pega (min)		191	-	-
Dimensão média das partículas (µm)		8,5	15,54	23,84
Diâmetro abaixo do qual encontra-se 10% das partículas (µm)		0,83	5,19	2,75
Diâmetro abaixo do qual encontra-se 90% das partículas (µm)		22,38	54,14	50,03

Fonte: Autoria própria.

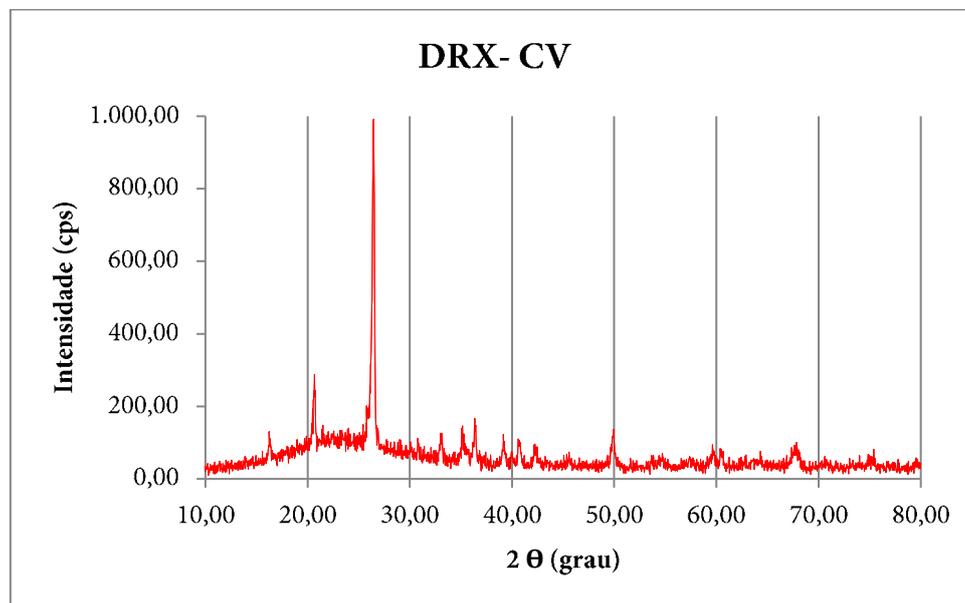
Tabela 02 – Composição química dos materiais cimentícios

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	CPV-ARI	Limites (NBR 5733/91)	CCA	CV
Perda ao fogo - PF	3,08	≤ 4,5%	0,25	1,00
Dióxido de Silício total - SiO ₂	18,81	-	94,84	65,50
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃	4,75	-	0,39	25,89
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃	2,68	-	0,54	3,15
Óxido de Cálcio total - CaO	60,88	-	1,32	0,34
Óxido de Magnésio - MgO	5,22	≤ 6,5%	0,40	1,53
Anidrido sulfúrico - SO ₃	2,28	≤ 4,5%	0,01	-
Óxido de sódio - Na ₂ O	0,18	-	0,11	0,21
Óxido de Potássio - K ₂ O	0,89	-	1,45	1,98
Resíduo insolúvel - RI	1,19	≤ 1,0%	-	-
Anidrido Carbônico - CO ₂	2,27	≤ 3,0%	-	-

Fonte: Autoria própria.

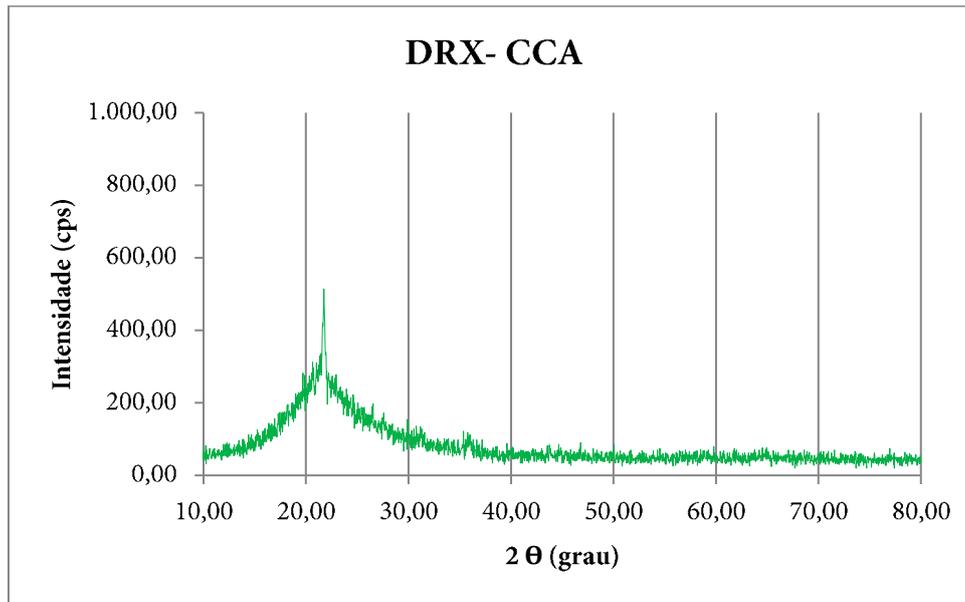
Já as Figuras 01 e 02 apresentam as Difrações de Raios 'X' da CV e da CCA, respectivamente. Percebe-se um maior grau de amorfismo na CCA, tendo em vista o menor aparecimento de picos cristalinos, assim, tendo maior reatividade que a CV.

Figura 01 – Difração de Raios X da Cinza Volante



Fonte: Autoria própria.

Figura 02 – Difração de Raios X da Cinza de Casca de Arroz



Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Agregados

Foram utilizados agregados graúdos e miúdos. Como agregado graúdo, brita com fração retida entre as peneiras 19 e 4,8mm, proveniente da cidade de Itaara – RS e como substituição parcial deste agregado utilizou-se resíduos de construção e demolição (RCD), provenientes da empresa GR2 de Santa Maria – RS. Como agregado miúdo foi empregado a areia com granulometria entre 4,8 e 0,15mm do rio Vacacaí de Santa Maria – RS.

Na Tabela 03 estão apresentadas as características físicas dos agregados (areia, brita e RCD).

Tabela 03 - Caracterização física dos agregados

Características Físicas	Areia	Brita	RCD
Massa específica (g/cm ³)	2,65	2,49	1,98
Massa unitária, (g/cm ³)	1,57	1,36	1,02
Módulo de finura	2,19	6,96	6,35
D. máx. característico (mm)	2,36	19	19
Absorção do agregado (%)	0,33	2,18	9,52
Índice de forma	-	1,59	3,24

Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Aditivo

Com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade do concreto utilizou-se aditivo hiperplastificante MasterGlenium54. Os dados técnicos estão apresentados na Tabela 04.

Tabela 04 – Característica do aditivo redutor de água

Característica do aditivo	Hiperplastificante
Densidade (g.cm-3)	1,10
pH	6
Percentual de sólidos (%)	40
Base química	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido branco turvo

Fonte: BASF, 2014.

3.1.4 Água

Para a moldagem dos corpos de prova utilizou-se água potável proveniente da rede de abastecimento da Universidade Federal de Santa Maria.

3.2 Dosagem

O estudo da dosagem do concreto foi realizado de acordo com o método proposto por Helene e Terzian (1992). Devido à diminuição da resistência obtida pelos traços com substituição de 15 e 30% de RCD, em massa, empregou-se pozolanas para compensar esta queda, substituindo-se 25% de cimento, em massa pela CCA e CV em misturas binárias, e (15+10)% (CCA+CV) nas misturas ternárias.

O abatimento do tronco de cone especificado foi de 100 ± 20 mm, e para melhorar a consistência do concreto utilizou-se aditivo redutor de água. O teor de água/materiais secos foi estabelecido em H (kg/kg) = 8,22% e argamassa seca α (kg/kg) = 0,5, em que esses dados foram fixados para todos os traços de concreto e para cada relação água/materiais cimentícios (a/mc), na Tabela 05 estão apresentados os traços de concreto estudados.

3.3 Pré – Molhagem

A mistura dos RCD com os demais materiais componentes do concreto se deu com superfície saturada seca (SSS), devido a sua alta capacidade de absorção de água.

3.4 Procedimentos Experimentais

3.4.1 Resistência à Compressão Axial

Os ensaios de resistência à compressão axial obedeceram a NBR 5738 (ABNT, 2016) e NBR 5739 (ABNT, 2018), moldagem e cura dos corpos de prova e ensaio de compressão de corpo de prova cilíndrico, respectivamente.

Tabela 05 – Misturas de concreto estudadas

Composição do traço	a/mc	Traço unitário (c:cca:cv:a:b:rcd)	Aditivo %	Abatimento (cm)
Referência	0,35	1: 1,13: 2,13	0,16	9
	0,475	1: 1,89: 2,89	0,10	9
	0,65	1: 2,95: 3,95	-	8
RCD 15%	0,35	1: 1,13 : 1,81: 0,32	0,10	9
	0,475	1: 1,89: 2,46: 0,43	0,15	12
	0,65	1: 2,95: 3,36: 0,59	-	12
RCD 30%	0,35	1: 1,13: 1,49: 0,64	0,10	9
	0,475	1: 1,89: 2,02: 0,87	-	10
	0,65	1: 2,95: 2,77: 1,19	-	12
RCD 15% CCA 25%	0,35	0,75: 0,25: 1,02: 1,81: 0,32	0,40	11
	0,475	0,75: 0,25: 1,78: 2,46: 0,43	0,20	8
	0,65	0,75: 0,25: 2,85: 3,36: 0,59	0,20	8
RCD 30% CCA 25%	0,35	0,75: 0,25: 1,02: 1,49: 0,64	0,40	10
	0,475	0,75: 0,25: 1,78: 2,02: 0,87	0,38	10
	0,65	0,75: 0,25: 2,85: 2,77: 1,19	0,25	8
RCD 15% CV 25%	0,35	0,75: 0,25: 1,04: 1,81: 0,32	0,18	9
	0,475	0,75: 0,25: 1,80: 2,46: 0,43	0,20	8
	0,65	0,75: 0,25: 2,86: 3,36: 0,59	0,15	11
RCD 30% CV 25%	0,35	0,75: 0,25: 1,04: 1,49: 0,64	0,22	9
	0,475	0,75: 0,25: 1,80: 2,02: 0,87	0,10	11
	0,65	0,75: 0,25: 2,86: 2,77: 1,19	0,10	9
RCD 15% CCA+CV (15%+10%)	0,35	0,75: 0,15: 0,10: 1,03: 1,81: 0,32	0,30	8
	0,475	0,75: 0,15: 0,10: 1,79: 2,46 0,43	0,30	9
	0,65	0,75: 0,15: 0,10: 2,85: 3,36: 0,59	0,25	11
RCD 30% CCA+CV (15%+10%)	0,35	0,75: 0,15: 0,10: 1,03: 1,49: 0,64	0,40	10
	0,475	0,75: 0,15: 0,10: 1,79: 2,02: 0,87	0,26	10
	0,65	0,75: 0,15: 0,10: 2,85: 2,77: 1,19	0,22	9

Fonte: Autoria própria.

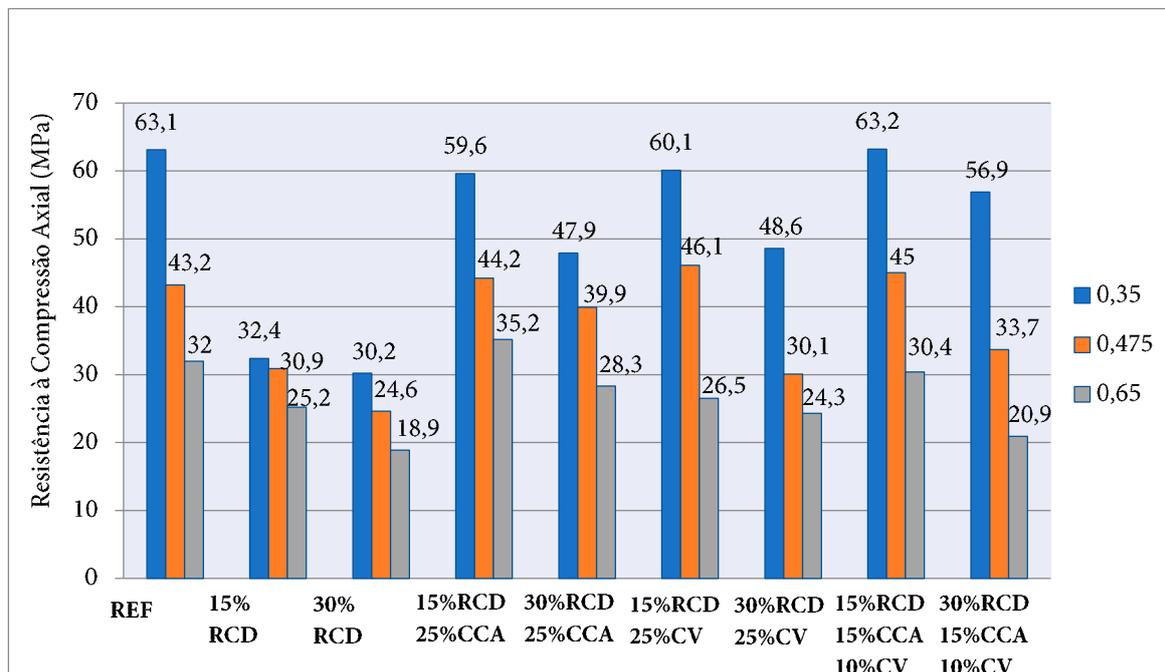
As fôrmas utilizadas para moldagem dos corpos de prova foram metálicas, com dimensões de 10 x 20 cm. Foram ensaiados 04 corpos de prova para cada traço na idade de 28 dias.

4 Resultados e Discussões

Os resultados para o ensaio de Resistência à Compressão Axial (média) para as diferentes substituições e relações água/materiais cimentícios (a/mc) são apresentados na Figura 03 a seguir, a qual apresenta o gráfico dos resultados para substituição de

15% e 30% do agregado graúdo natural pelo RCD, bem como, para as misturas binárias e ternárias.

Figura 03 – Resistência à Compressão Axial de todas as misturas estudadas



Fonte: Autoria própria.

Como esperado, observa-se que todas as misturas apresentam maior resistência à compressão axial para as menores relações água/materiais cimentícios (a/mc) concordo, fato que se deve ao aumento da compacidade, do grau de hidratação e refinamento dos poros. Também percebe-se que os melhores resultados foram obtidos pelas amostras sem substituições de agregado graúdo natural (referência) pelo agregado residual, verificando-se que as maiores diferenças em relação à amostra de referência ocorrem quando se utilizou a relação a/mc de 0,35, e ao passo que se aumentou as relações a/mc , a influência da substituição dos agregados graúdos na resistência a compressão axial passou a ser um fator secundário.

Quando substituiu-se 15% e 30% de agregado graúdo natural por RCD com relação a/mc 0,35 houve diminuição da resistência de 48,7% e 52,1%, respectivamente. Já para a relação a/mc 0,475 a diminuição de resistência foi menor, sendo 28,5% e 43,1% para as substituições de 15% e 30%, respectivamente. E as misturas com relação a/mc 0,65 tiveram queda de resistência à compressão de 21,5% para 15% de substituição de RCD e 41,1% para as substituições de 30% de RCD.

Constatando-se desta forma que quanto maior a porcentagem de substituição de agregados graúdos naturais pelos residuais, maiores serão as perdas de resistência, pois, as propriedades físicas do RCD têm uma considerável influência nas propriedades mecânicas do concreto, considerando-se que haja a substituição parcial ou total do agregado graúdo natural pelo agregado artificial. As duas principais características

influenciadas por estas substituições são a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade, principalmente, devido à alta porosidade dos agregados, e consequentemente alta absorção de água dos mesmos, portanto, do concreto como um todo, além, de baixas massas unitárias e específicas (SAMI; AKMAL, 2009).

Esses mesmos autores verificaram que a substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de maior resistência, origina concretos de resistência mais elevada e a substituição de agregados de menor resistência, geram concretos de pequena resistência, sendo assim, o uso de agregado graúdo, oriundo de concreto reciclado com resistência igual a 50 MPa, resultará num concreto com resistência a compressão comparável ao confeccionado com agregado graúdo natural. Conclui-se assim, que quando o agregado graúdo natural (matriz) for de maior resistência que o ARC, ocorrerão reduções na resistência do concreto, porém, se a matriz for menos resistente que o ARC, o concreto não sofrera perdas de resistência e até mesmo poderá obter aumentos significativos na mesma em decorrência da resistência individual do agregado reciclado de concreto, tendo em vista que, o concreto se romperá no constituinte mais fraco, independente dele ser a matriz ou não.

Comparando-se as misturas com substituições de RCD e com RCD+CCA, percebe-se que as misturas com cinza de casca de arroz (CCA) resultaram em melhores resistências, tanto com substituições de 15% como de 30% de RCD, em todas as relações a/mc. Verificou-se que quando se substituiu 15% de RCD e 25% de CCA o aumento de resistência em relação às misturas com somente substituição de agregados resultou em 83,9%, 43% e 39,7% para as relações a/mc 0,35, 0,475 e 0,65, respectivamente. Da mesma forma, quando substituiu-se 30% de RCD e 25% de CCA observou-se um aumento da resistência, mas não tanto quanto na substituição com 15%RCD+25%CCA, esse aumento foi de 58,6%, 15,3% e 49,7% para as relações a/mc 0,35, 0,475 e 0,65, respectivamente.

Também estudaram-se misturas com substituições de cimento por 25% de cinza volante, notando-se que ocorreu um processo semelhante com as amostras em que utilizou-se substituições do cimento por 25% de cinza de casca de arroz. Atingiram-se resistências à compressão axial semelhantes sem diferenças significativas, independente das relações a/mc, apesar de uma possível menor reatividade da CV em relação à CCA, devido ao grau de amorfismo verificado nas difrações de raios 'X' apresentadas na caracterização dos materiais.

Por meio desses resultados percebe-se que a substituição de pozolanas acabou compensando a diminuição de resistência ocasionada pela substituição do agregado graúdo natural pelo agregado residual, tendo em vista que as resistências chegam bem próximas dos traços de referência. Nesse contexto, a CCA e a CV entram como elementos que promovem modificações na microestrutura do concreto, proporcionando o refinamento dos poros, uma maior compacidade na interface

pasta/agregado (devido às partículas finas nessas adições) e pela formação de C-S-H secundário através do consumo de CH pelo efeito pozolânico.

Logo, a finura das pozolanas, apresentadas na Tabela 01 através da Área Específica BET (m^2/g) e demais dados pertinentes, é a característica física mais importante a ser levada em consideração, pois, para que a mesma desenvolva compostos cimentantes através do efeito pozolânico, deverá apresentar uma finura maior que as partículas de cimento. Por isso, Mehta e Monteiro (2014) relatam que as adições minerais promovem efeitos favoráveis ao concreto, principalmente pelo fato de causar uma redução considerável na porosidade das pastas e refinar os grãos de hidróxido de cálcio. A redução de porosidade proporcionada pela alteração da microestrutura ocasiona um aumento da compactidade e, conseqüentemente, dificulta o ingresso de agentes agressivos ao interior do concreto.

Ainda estudaram-se misturas ternárias com substituição do cimento nos teores de 15% por CCA+ 10% por CV, em relação às misturas com substituição do agregado graúdo natural por agregado residual (15% e 30% de RCD). Evidenciou-se que assim como nas misturas binárias, houve aumento de resistência em comparação com as misturas em que foi substituído somente o agregado. Esse aumento de resistência foi de 95,1%, 45,6% e 20,6% para as misturas com 15% de RCD + pozolanas e relação a/mc de 0,35, 0,475 e 0,65, respectivamente. Já para as misturas com 30% de RCD + pozolanas, as resistências alcançadas não foram tão altas, sendo o aumento de 88,4%, 37% e 10,6% para as relações a/mc de 0,35, 0,475 e 0,65, respectivamente.

De acordo com Isaia (2016), quando se utiliza uma pozolana menos reativa como a cinza volante (ou filer), junto com outra(s) mais reativa(s) como a sílica ativa ou cinza de casca de arroz, existe uma sinergia entre elas, devida ao efeito pozolânico (reatividade química) e efeito físico (nucleação de novos locais de hidratação ou obstrução de poros), resultando um acréscimo para o desempenho da variável estudada, do que a simples soma aritmética das misturas binárias em relação às ternárias. Zunino e Lopez (2016) apresentam os efeitos físicos e químicos de misturas de CCA com pozolana natural, a partir do uso de fileres calcários inertes, em que os resultados de resistência apresentaram acréscimo de 78% devido ao efeito químico e 22% de efeito físico.

Então, de maneira geral, através da Figura 03 verifica-se que a mistura ternária com 15% de RCD foi a que obteve melhor resultado para todas as relações a/mc em relação ao traço de referência, podendo ser considerada a melhor alternativa entre as demais quanto à resistência à compressão axial. Pode ser observado também que utilizando 30% de RCD tanto nas misturas binárias como nas ternárias ocorre uma diminuição da resistência comparando-se com as misturas com 15% de RCD, sendo esta queda mais acentuada para a relação água materiais cimentícios (a/mc) 0,35.

5 Considerações Finais

Após analisar os resultados das amostras estudadas, pode-se perceber que as misturas com substituições apenas de agregados graúdos pelos residuais apresentaram diminuição da resistência à compressão para todas as relações água/materiais cimentícios (a/mc) em relação à mistura referência. No entanto, quando se substituiu parcialmente o cimento em misturas binárias e ternárias observou-se um aumento considerável da resistência à compressão axial, com alguns valores superiores aos de referência e outros bastante próximos.

Foi possível verificar que as misturas ternárias com 15% de agregados residuais resultaram em melhores resistências em relação à mistura referência. Em que observando-se as mesmas misturas, mas com aumento da porcentagem de substituição de RCD de 15% para 30%, ocorreu uma diminuição dessa resistência, fato que já era evidenciado devido as propriedades deste tipo de agregado influenciarem nas características do concreto.

Portanto, concluiu-se que é viável a utilização de agregados reciclados e pozolanas em misturas de concreto mediante estudos prévios dos materiais a serem utilizados, bem como dos traços de concreto a serem produzidos, trazendo desta forma benefícios não somente em relação às propriedades do mesmo, mas principalmente pela redução do consumo de cimento Portland através das substituições, que conseqüentemente contribuem para a redução dos impactos ambientais causados pelo setor da construção civil.

Referências

- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2014*. Cap. 3. Acesso em 08/07/2016. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15113 - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes–Aterros–Diretrizes para projeto, implantação e operação*. ABNT, São Paulo. 2004.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12653 - Materiais pozolânicos — Requisitos*. São Paulo; ABNT, 2015.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5733 - Cimento Portland de alta resistência inicial*. Rio de Janeiro; ABNT, 1991.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova*. Rio de Janeiro; ABNT, 2016.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12653 - Materiais pozolânicos – especificação*. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Manual of Concrete Practice. Use of Fly Ash in Concrete: ACI 232.2R*, Farmington Hills, 1996.
- ÂNGULO, S. C. *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento*. De concretos. 167p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- ASTM C 618 – Standard Specification for Fly ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. Philadelphia, 1978.
- BASF REPORT 2014. *Economic, environmental and social performance*. Disponível em: https://www.basf.com/documents/corp/en/aboutus/publications/reports/2015/BASF_Report_2014.pdf. Acesso em: 12 de janeiro de 2017.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. *Resolução CONAMA nº 307/2002*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>. Acesso em: 18 de junho de 2016.
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo, 1992.
- ISAIA, G. C. *Projeto de pesquisa: Influência da nano/microestrutura de concretos com adições minerais e/ou resíduos no desempenho estrutural sob o enfoque da sustentabilidade por ACV e CCV*. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- ISAIA, G. C.; FURQUIM, P.; GASTALDINI, A. L. G. *Análise estatística de variáveis influentes na microestrutura e durabilidade de concretos com adições minerais*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 07-23, jan./mar. 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*. 2 ed. São Paulo. Ed. Nicole Pagan Hasparyk, 2014.

NEVES, Suzana Andreassa. *A qualificação da mão de obra para o aumento da produtividade em obras de construção civil: responsabilidades compartilhadas*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

PABLOS, J. M.; SICHIERI, E. P. Study to reuse an industrial solid waste generated by foundry sands. *Journal of Materials Science and Engineering*, v. 4, p. 16-25, 2010. PUCMINAS, Tempo e Clima.

PIRES, M. *Caracterização do carvão de Candiota e de suas cinzas visando a avaliação do impacto ambiental e a síntese de zeólitas - relatório final*. Barcelona: FAPERGS, 2002. 53 p. QUARTZO. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/tectossilicatos/quartzo.html>. Acesso em: 24 out 2016.

ROCHA JUNIOR, C. A. F. 2011. *Caracterização física, química e mineralógica de cinza leve de caldeira e sua utilização na síntese de zeólitas e aplicação do material zeolítico na adsorção de Cu⁺² e Cd⁺²*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

SAMI, W. T.; AKMAL, S. A. *Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete*. *Construction and Building Materials*. v. 23, p. 1163–1167, 2009.

ZUNINO, F., LOPEZ, M. *Decoupling the physical and chemical effects of supplementary cementitious materials on strength and permeability. A multilevel approach*. *Cement Concrete and Composites*. v. 65, jan. 2016, p. 19-28.