

Eixo Temático: Inovação e Sustentabilidade

**SUSTENTABILIDADE DE CONCRETOS COM POZOLANAS E RESÍDUOS
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

**SUSTAINABILITY OF CONCRETES WITH POZOLANAS AND RESIDUES OF
CONSTRUCTION AND DEMOLITION**

Cristiane Carine dos Santos, Cristian Jonathan Franco de Lima e Geraldo Cechella Isaia

RESUMO

Com o intuito de reduzir os impactos ambientais, vários setores da economia tem buscado repensar suas estratégias de produção, principalmente o setor da construção civil, que é um dos maiores consumidores de recursos naturais e geradores de resíduos. A presente pesquisa visa analisar misturas de concreto com agregado residual de construção e demolição (RCD) através de ensaios de resistência à compressão axial. Os concretos estudados foram moldados com substituição de dois teores de agregado residual, o cimento também foi substituído parcialmente por dois tipos de pozolanas em misturas binárias e ternárias. Para os ensaios de resistência à compressão axial foram moldados corpos de prova cilíndricos 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: cinza de casca de arroz, cinza volante, recursos naturais, materiais alternativos.

ABSTRACT

In order to reduce environmental impacts, several sectors of the economy have sought to rethink their production strategies, especially in the construction sector, which is one of the largest consumers of natural resources and waste generators. The present research aims to analyze concrete mixtures with residual aggregate of construction and demolition (RCD) through tests of resistance to axial compression. The concretes studied were molded with replacement of two residual aggregate contents, the cement was also partially replaced by two types of pozzolans in binary and ternary mixtures. For axial compressive strength tests cylindrical specimens were molded and cured in a humid chamber for a period of 28 days. From the results, it was possible to notice that, in relation to the reference line (without substitutions), the concretes with pozzolans, both in binary and ternary mixtures obtained resistance to axial compression very close to the reference, whereas the molded traces with substitutions only of aggregates resulted in Resistance to axial compression. However, it was concluded that in relation to the axial compressive strength the use of RCD in concrete is feasible, however when using pozzolans in the mixture.

Keywords: Gray rice husk, fly ash, natural resources, alternative materials.

1 INTRODUÇÃO

As preocupações relacionadas com o meio ambiente têm aumentado de maneira bastante intensa, principalmente quanto às poluições, contaminações do solo, mudanças climáticas e escassez de recursos não renováveis, e perante a isso a sustentabilidade tem se tornado um dos assuntos mais importantes quanto à qualidade de vida e a sobrevivência dos seres vivos.

Alcançar o desenvolvimento sustentável vem sendo o foco de muitas empresas, com objetivos de tentar diminuir as emissões de gases que poluem o meio ambiente e que provocam o efeito estufa, um dos setores da economia responsável por esses acontecimentos e que consome grande quantidade de recursos naturais e gera um volume significativo de resíduos é a construção civil.

O que vem sendo considerado um dos maiores desafios enfrentados pela construção civil é a tentativa de equilibrar as edificações e obras de infraestrutura ao mesmo tempo em que se desenvolvem produtos sustentáveis durante todo o seu ciclo de vida. Diante disso, considera-se que o ambiente construído tem grande importância nas atividades humanas, o que fica evidente a forte ligação que existe entre a indústria da construção e o desenvolvimento sustentável, pois se for feita uma análise pode-se perceber que a maior parte do tempo as pessoas permanecem dentro de edifícios, tanto em suas residências como em locais de trabalho.

Com o intuito de diminuir os inúmeros impactos ambientais que são gerados pela construção civil, pesquisadores tem-se voltado a estudos de materiais que possam substituir o cimento na produção de concreto, já que este é um dos principais constituintes do mesmo, e o que mais gera emissões para a atmosfera. Uma das alternativas de grande importância são as substituições por adições minerais, pois reforçam a zona de transição entre a pasta e os agregados, principalmente entre os reciclados, que são responsáveis pela redução da resistência mecânica quando essas adições não são utilizadas, também quanto aos aspectos ambientais, pois reduzem as emissões de CO₂, consumo de energia, e na maioria das vezes consegue-se diminuir os custos.

Dentre as inúmeras propriedades apresentadas pelo concreto que permitem uma maior perspectiva em relação a sustentabilidade destacam-se a durabilidade, resistência ao fogo e agentes naturais, resistência à compressão, possibilidade de substituir o cimento por materiais alternativos, e os agregados naturais por residuais.

Pesquisas relacionadas à sustentabilidade de materiais de construção civil são consideradas cada vez mais importantes, tendo destaque em nível mundial pela grande importância que este setor representa para o desenvolvimento da humanidade e preservação ambiental, e principalmente pelo efeito da escala de consumo por este setor industrial. Dentro deste contexto, este estudo visa proporcionar benefícios para a sustentabilidade do planeta por meio de soluções tecnológicas simples, realizadas de forma prática e viável.

Os objetivos deste estudo caracterizam-se pela verificação da eficiência do concreto estrutural, através de resultados de resistência à compressão axial, com substituições de agregado natural por resíduos de construção e demolição (RCD), e ainda substituição do cimento por dois tipos de pozolanas, cinza de casca de arroz e cinza volante.

2 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O termo sustentabilidade surgiu a partir do Relatório de *Brundtland* denominado “Nosso futuro comum” pela *World Commission on Environment and Development* (WCED, 1987), onde definiu-se o desenvolvimento sustentável como sendo o atendimento as necessidades do presente, sem comprometer o atendimento das necessidades das futuras gerações.

Pode-se se afirmar que o termo sustentável surgiu da necessidade de conciliar o crescimento da população com a preservação do Planeta, o que incentivou nos anos

subsequentes a realização de conferências mundiais, em que foram firmados protocolos internacionais, com o objetivo de rever metas e elaborar mecanismos para o desenvolvimento sustentável.

Com a realização de conferências e visando a sustentabilidade, foi publicada a Agenda 21, em 1992, em forma de um projeto internacional para o desenvolvimento sustentável em todos os setores da economia (*The International Council for Research and Innovation in Building and Construction* e *United Nations Environment Programme - International Environmental Technology Centre*, 2002).

A sugestão da Agenda 21 é que seja feita uma interpretação prática dos conceitos de sustentabilidade, para tentar equilibrar os parâmetros de proteção ambiental com as preocupações sociais e econômicas, enfatizando também a importância da gestão dos recursos naturais (*Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento*, 1996).

A incorporação de práticas sustentáveis vem sendo realizada por diversos setores econômicos, sendo a construção civil um destes que tem mostrado bastante interesse através do estudo de novos materiais e estratégias de produção. Desta forma, Agopyan e John (2011) apontam que a dimensão do ambiente construído provoca grandes impactos ambientais, envolvendo o uso de uma grande quantidade de materiais de construção, mão de obra, água, energia e geração de resíduos.

No entanto, a construção civil tem voltado suas atenções em relação aos impactos gerados por suas atividades por meio de pesquisas, para tentar propor soluções que melhorem as práticas construtivas, reduzindo os impactos ambientais sem, contudo perder a qualidade dos materiais e da construção como um todo.

2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

Os resíduos gerados pela construção civil são responsáveis de acordo com Ângulo (2005) por 50% do total de resíduos sólidos urbanos (RSU) que são produzidos pela população, sendo gerados durante todo o processo de construção.

O CONAMA nº 307 (2002) e a NBR 15113 (ABNT, 2004) definem os resíduos gerados pela construção civil como resíduos provenientes de construções, reparos, reformas e demolições, os 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, caliça ou metralha.

E a resolução CONAMA nº 307 (2002) classifica os resíduos de construção civil em quatro classes, que são:

I - Classe A – resíduos recicláveis ou reutilizáveis como os agregados: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, com inclusão de solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fio etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B – resíduos que são recicláveis para outras destinações, como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras, entre outros;

III - Classe C - resíduos que não podem ser reciclados/reutilizados devido à falta de desenvolvimento de tecnologias ou aplicações economicamente viáveis, como por exemplo, produtos provenientes do gesso;

IV - Classe D: resíduos perigosos resultantes do processo de construção, como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde, oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem

como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Se os RCD não são descartados de forma adequada eles trazem certos problemas tanto ao meio ambiente como para a humanidade. Conforme o Manual sobre os Resíduos Sólidos da Construção Civil (2011) a disposição inadequada desses resíduos afeta a paisagem local; tráfego de pessoas e veículos; provoca assoreamentos de rios, córregos e lagos; bem como o entupimento de drenagem urbana, resultando em enchentes; além de servirem como depósitos de outros tipos de resíduos não inertes, favorecendo o surgimento e aumento de doenças, trazendo riscos à saúde da população que está próxima.

Considerando este contexto, evidencia-se a reciclagem dos resíduos gerados pela construção civil como uma das principais alternativas, principalmente no que diz respeito ao meio ambiente, que podem retornar como materiais substituintes de matérias-primas que são constantemente extraídas do meio ambiente.

2.2 POZOLANAS

As pozolanas estão sendo cada vez mais estudadas e utilizadas na área da construção civil, tendo como objetivo a redução do impacto ambiental global com a redução das emissões de CO₂. Pois além do emprego desses materiais melhorarem as propriedades do concreto, contribuem de forma bastante significativa para a sustentabilidade.

Entre as pozolanas mais estudadas estão às cinzas de casca de arroz, cinza volante, sílica ativa, entre outras. Quando esses materiais são adicionados ao concreto, provocam inúmeros efeitos, que de acordo com Mehta e Monteiro (2008) são processos que ocorrem devido às características das partículas. Um dos efeitos causados é o microfiler dos poros, devido às pequenas partículas das pozolanas, outro acontecimento é o efeito da reação pozolânica, em que a sílica amorfa presente nas pozolanas altamente reativas consome ácido clorídrico (CH), alterando assim a microestrutura da zona de transição da pasta com os agregados, resultando em uma interface menos porosa e mais uniforme, desta forma melhora as propriedades do concreto.

Particularmente em relação a cinza de casca de arroz, que é um subproduto resultante da queima da casca de arroz. Este material vem sendo cada vez mais testado e utilizado pela construção civil, com o intuito de reduzir os impactos que são causados ao meio ambiente e ao mesmo tempo melhorar as propriedades do concreto, já que inúmeros estudos apontam para a viabilidade de substituir-se parcialmente o cimento por subprodutos agroindustriais na produção de concretos.

As cinzas volantes também são bastante utilizadas, caracterizadas como subprodutos resultantes da combustão do carvão mineral em caldeiras, o que torna-se um problema para as empresas geradoras deste material no momento de descarte final. Por isso nos dias atuais vem desenvolvendo-se com maior intensidade estudos de aplicações dessas cinzas, como por exemplo, em substituição parcial aos constituintes de concretos e argamassas, visto que esta cinza possui atividades pozolânicas e se encontram disponíveis em maior quantidade na região sul do Brasil.

No entanto, pode-se considerar que tanto as cinzas volantes como as de casca de arroz apresentam inúmeras vantagens quando relacionadas ao concreto, que são não apenas técnicas e econômicas, mas principalmente ambientais, sendo que reduzem as quantidades de resíduos que são descartados de maneira incorreta e diminuem as emissões de CO₂ liberados durante a fabricação do cimento.

3 METODOLOGIA

Nesta sessão é apresentada a metodologia aplicada para a moldagem dos corpos de prova de concreto, bem como, a caracterização dos materiais utilizados, os procedimentos para produção das misturas com e sem substituição do agregado graúdo natural por agregado proveniente de resíduos de construção e demolição (RCD), além das substituições do cimento Portland por cinza volante e cinza de casca de arroz, em misturas binárias e ternárias.

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 (ABNT NBR 5739:2007), tendo em vista que, a eficiência, durabilidade e sustentabilidade das estruturas de concreto estão diretamente ligadas com a sua capacidade de resistir a cargas incidentes de compressão, não apresentando deformações exageradas ou desproporcionais. Para a moldagem dos corpos de prova baseou-se na ABNT NBR 5738 (2016).

Por meio do processo de análise experimental, o qual nos permite a 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 ou padrão.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Foi realizada a análise das propriedades físicas e químicas dos materiais selecionados, 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 CPV-ARI, produzido em território nacional, conforme a norma NBR 5733: 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 1 estão representadas as características físicas dos materiais cimentícios, e a composição química pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 1 - 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: autores.

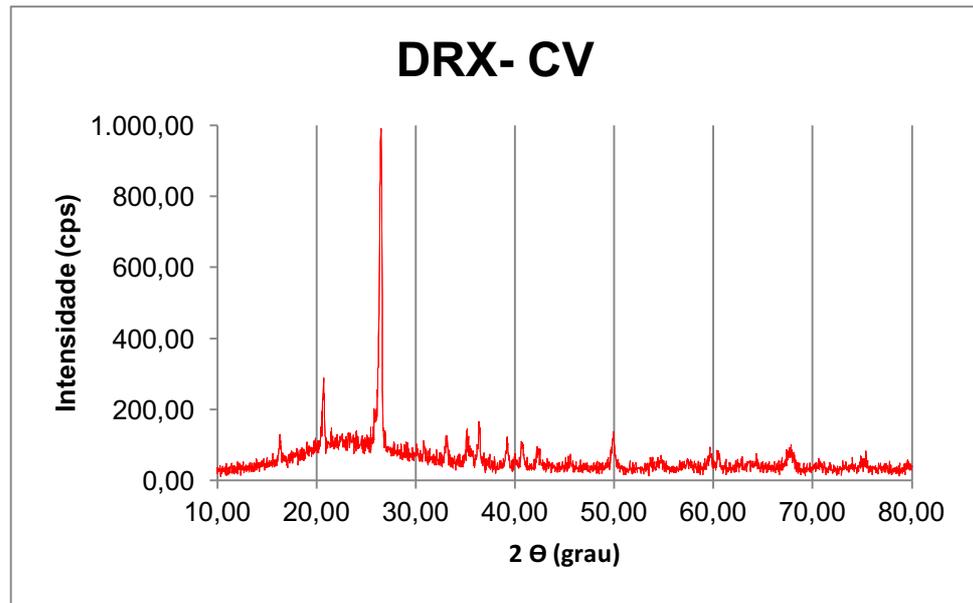
Tabela 2 - Composição química dos materiais cimentícios

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	CPV-ARI	Limites (NBR 5733/91)	CCA	CV
Perda ao fogo - PF	3,08	$\leq 4,5\%$	0,25	1,00
Dióxido de Silício total - SiO₂	18,81	-	94,84	65,50
Óxido de Alumínio - Al₂O₃	4,75	-	0,39	25,89
Óxido de Ferro - Fe₂O₃	2,68	-	0,54	3,15
Óxido de Cálcio total - CaO	60,88	-	1,32	0,34
Óxido de Magnésio - MgO	5,22	$\leq 6,5\%$	0,40	1,53
Anidrido sulfúrico - SO₃	2,28	$\leq 4,5\%$	0,01	-
Óxido de sódio - Na₂O	0,18	-	0,11	0,21
Óxido de Potássio - K₂O	0,89	-	1,45	1,98
Óxido de Titânio - TiO₂	0,3	-	-	-
Pentóxido de Fósforo - P₂O₅	0,16	-	-	-
Óxido de Manganês - Mn₂O₃	0,04	-	-	-
Óxido de Cálcio livre - CaO	1,17	-	-	-
Resíduo insolúvel - RI	1,19	$\leq 1,0\%$	-	-
Anidrido Carbônico - CO₂	2,27	$\leq 3,0\%$	-	-

Fonte: autores.

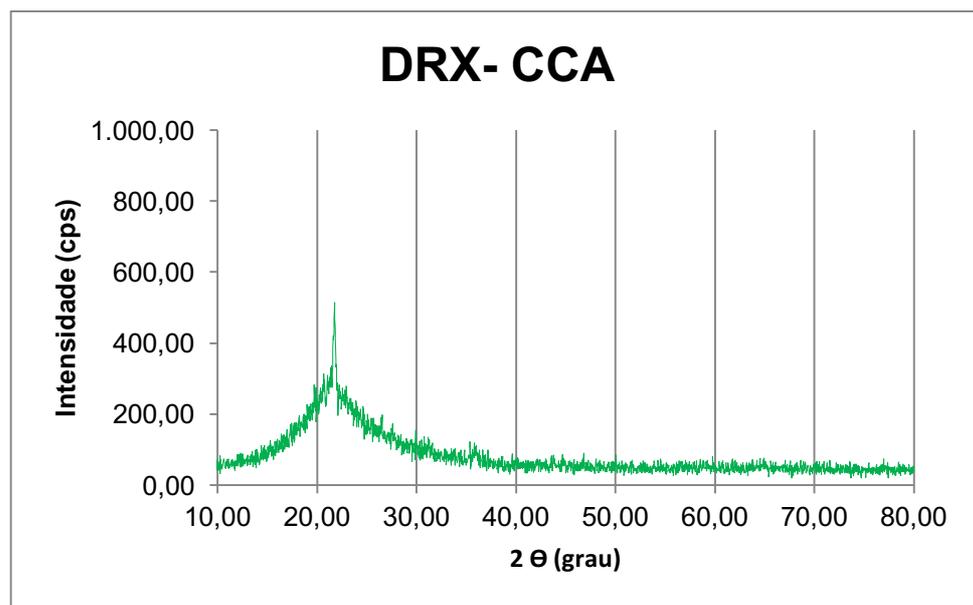
Já as Figuras 01 e 02 apresentam as Difrações de Raios 'X' da CV e da CCA, respectivamente. Percebe-se um maior grau de amorfismo na CCA, tendo em vista o menor aparecimento de picos cristalinos, assim, tendo maior reatividade que a CV.

Figura 01 – Difração de Raios X da Cinza Volante



Fonte: autores.

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



Fonte: autores.

3.1.2 Agregados

O agregado graúdo utilizado foi 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 3 estão representadas as características físicas dos agregados - areia, brita e RCD.

Tabela 3 - 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: autores.

3.1.3 Aditivo

Com o intuito de melhorar a trabalhabilidade do concreto foi utilizado aditivo hiperplastificante MasterGlenium54.

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 DO CONCRETO

A dosagem do concreto foi realizada 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 4 estão apresentados os traços de concreto estudados.

Tabela 4 – 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: autores.

3.2.1 Pré - molhagem

A utilização dos RCD na composição do concreto ocorreu com superfície saturada seca (SSS), devido a sua alta capacidade de absorção de água.

3.3 ENSAIOS E PROCEDIMENTOS

Os ensaios de resistência à compressão axial foram norteados pela NBR 5738 (2016) e NBR 5739 (2007), moldagem e cura dos corpos de prova e ensaio de compressão de corpo de prova cilíndrico, respectivamente.

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.

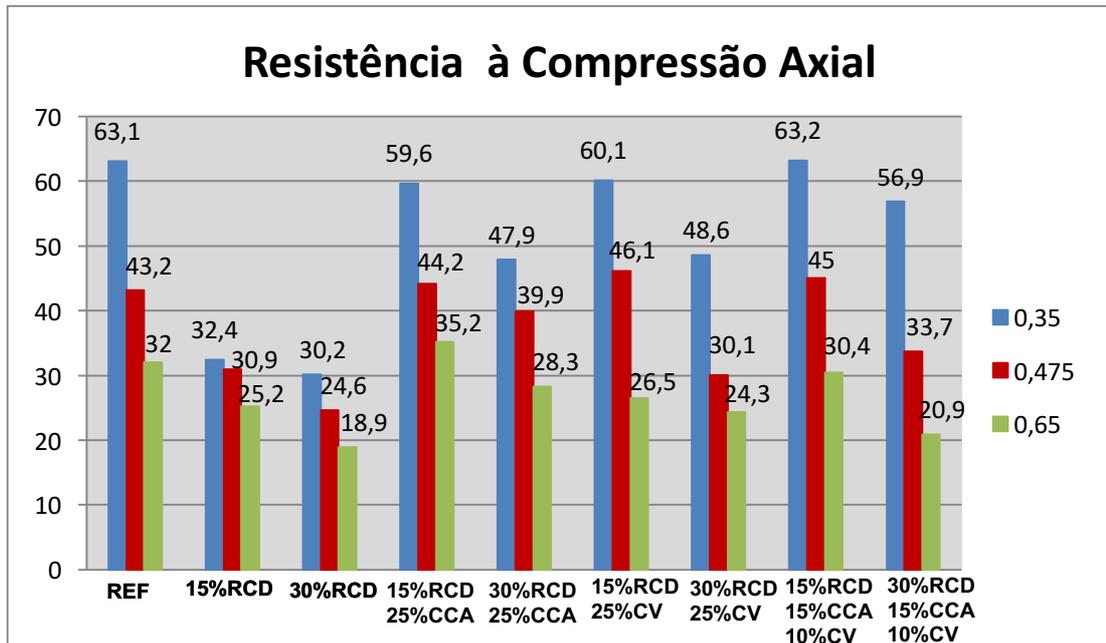
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta etapa serão apresentados os resultados dos ensaios propostos juntamente com a análise dos mesmos. Primeiramente é realizada uma análise individual e para finalizar relacionados todos os resultados.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

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: autores.

Como esperado, observa-se que todas as misturas apresentam maior resistência à compressão axial para as menores relações água/materiais cimentícios (a/mc), fato que se deve ao aumento da compactidade, 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 conseqüentemente alta absorção de água dos mesmos, portanto, do concreto como um todo, além, de baixas massas unitárias e específicas (Sami e 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 compacidade 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.

___ **NBR 12653 - Materiais pozolânicos — Requisitos.** São Paulo; ABNT, 2015.

___ **NBR 5733 - Cimento Portland de alta resistência inicial.** Rio de Janeiro; ABNT, 1991

___ **NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro; ABNT, 2016.

___ **NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio

de Janeiro: ABNT, 2007.

___ **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](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.

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). 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.