

Concretos com Agregados Residuais de Construção e Demolição e Pozolanas

Concrete with Construction and Demolition Residual Aggregates

C.C. Santos^{a†}, G.C. Isaia^a

^a *Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio Grande do Sul, Brasil*

[†] *Autor para correspondência: cristianecossantos@hotmail.com*

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 à 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 da 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.

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 residual aggregate (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

Palavras-chave:

Concreto; Material
pozolânico;
Resistência à
compressão axial.

Keywords:

Concrete; Pozzolanic
material; Resistance
to axial
compression.

that in relation to the axial compressive strength the use of RCD in concrete is feasible, but when using pozzolans in the mixture.

1. Introdução

Governos de todo o mundo têm lutado para equilibrar o crescimento econômico com seus efeitos negativos sobre o meio ambiente, tanto nas regiões desenvolvidas quanto nas em desenvolvimento [1]. No entanto, a população mundial está com previsão de atingir 70% do total de pessoas residindo em centros urbanos até 2050 [2], processo que requer um volume maior de obras nas cidades para atender à demanda. Portanto, o progresso da economia e da sociedade de uma nação tem relação próxima com a indústria da construção, mas também eleva a quantidade de recursos naturais consumidos por essa indústria, 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.

Em 2021, cada tonelada de cimento era produzida com emissões 18% menores do que três décadas antes [3]. Neste período, porém, a demanda de cimento no mundo triplicou. O resultado é que, apesar dos avanços tecnológicos do setor, suas emissões continuam subindo. O relatório conjunto da Agência Internacional de Energia e do Conselho Global de Negócios para o Desenvolvimento Sustentável [4] corrobora esta informação, em que, até 2050, a produção global de cimento deve aumentar 12%, mas suas emissões crescem “somente” 4%. 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. Metha e Monteiro [5] afirmam que as adições minerais melhoram as propriedades do concreto, como a microestrutura, reduzem a segregação e exsudação devido à segmentação dos canais de percolação da água e promovem o aumento de locais de nucleação para os produtos de hidratação, fazendo com que a pasta fique mais homogênea. Com isso, os grãos menores, por efeito físico, diminuem o efeito parede na zona de transição devido ao empacotamento dos poros, promovendo o aumento da resistência. Também, outra alternativa é a substituição parcial do agregado gráudo natural por agregado gráudo 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 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.

1.1. Objetivos

Verificar a eficiência do concreto estrutural, através dos resultados de resistência a compressão axial, substituindo parcialmente o agregado gráudo 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 (para compensar a resistência do concreto com o uso de RCD).

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 do país, pois é responsável por mais de 10% do Produto Interno Bruto (PIB), mas por sua vez, gera consideráveis impactos ambientais, tanto pelo consumo de recursos naturais, como pela geração de resíduos [6]. 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 se encontram em atraso, mesmo com os problemas de escassez das áreas para aterros, principalmente em regiões metropolitanas.

Os resíduos gerados pela construção civil são definidos pela resolução do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 307 [7] e pela ABNT NBR 15113 [8] 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 no Brasil como 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 [9] são responsáveis por 50% do total de resíduos sólidos urbanos (RSU) que são produzidos pela população.

Pesquisas apontam [10,11,12,13] que existe um aumento acelerado na geração de RCD, pois com o crescimento da população necessitam-se quantidades maiores de infraestruturas [2]. Conforme a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE [14] foram coletados pelos municípios brasileiros no ano de 2020 cerca de 47 milhões de toneladas de RCD, apresentando um aumento de 5,5% em relação ao ano anterior. Com isso, a quantidade coletada foi de 221,2 kg por habitante/ano.

Para Vieira e Dal Molin [11] a utilização de agregados reciclados em concretos não afetam a sua resistência à compressão e a durabilidade, mas enfatizam a importância dos tratamentos deste material, desde o beneficiamento até o momento da utilização, fazendo com que suas propriedades sejam conhecidas e as limitações de seu uso diminuam. Diversos estudos realizados com a utilização de RCD em concretos confirmam a viabilidade de utilização deste material, mas, conforme Cabral [12] deve-se levar em consideração a relação água/materiais cimentícios (a/mc), pois este é um dos principais fatores que interferem na resistência a compressão. No entanto, de acordo com Banthia e Chan [13] as diferenças entre as propriedades dos concretos convencionais e dos concretos com a utilização de agregados reciclados é resultante de alguns fatores, como o teor de substituição deste agregado, da característica do concreto original, da natureza e nível de contaminantes, quantidade de finos e argamassa que está aderida ao agregado, entre outros fatores.

Por apresentar propriedades diferentes dos agregados naturais, os agregados provenientes de RCD possuem interferências nas propriedades dos materiais aos quais eles fazem parte, algumas delas benéficas e outras nem tanto, como por exemplo, quando adicionado ao concreto, muitas vezes reduz a resistência mecânica. No entanto, Mehta e Monteiro [5] mencionam que a redução da resistência à compressão desses concretos, pode chegar a, pelo menos, dois terços da resistência atingida pelo concreto referência, ou seja, produzido com somente agregado natural. Desta forma, Leite [15] afirma que a redução da resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados é devida à alta porosidade desses materiais, e também pela porosidade da zona de transição.

Neste contexto, estudos realizados por Correia et al. [16] inferem que para as substituições de 100% e 22% do agregado natural pelo reciclado, obteve-se redução da resistência à compressão de 45% e 22%, respectivamente, atribuindo esses resultados as propriedades dos agregados que foram utilizados. Já nas pesquisas realizadas por Rahal [17] os concretos com substituições de 100% por agregados graúdos reciclados resultaram em uma redução da resistência à compressão de 9% em relação ao concreto referência, mas

em outra pesquisa realizada pelo mesmo autor, ele obteve uma redução bem maior, chegando a 45%.

Mesmo apresentando redução na resistência à compressão, os concretos produzidos com agregados reciclados podem ter sua resistência aumentada através de alguns procedimentos realizados durante a preparação da mistura de concreto. Entretanto, Araújo [10] aponta que a menor resistência obtida pelos concretos com RCD é consequência da sua maior porosidade em relação aos agregados convencionais, mas com a redução da relação água/materiais cimentícios (a/mc), esta resistência pode ser aumentada, pois se reduz a porosidade da pasta de cimento.

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 ABNT NBR 12653 [18] 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 [19], 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 cinza de volante (CV) e a cinza de casca de arroz (CCA) são alguns dos subprodutos cada vez mais estudados e utilizados nas últimas décadas, tendo como propósito tentar reduzir os impactos negativos ocasionados ao meio ambiente e ao mesmo tempo melhorar as propriedades do concreto, pois existem várias [20,5] pesquisas que apontam a viabilidade de substituir-se parcialmente o cimento por estes subprodutos agroindustriais.

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 [21], 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 [22] acrescenta que a parte restante é formada a partir de componentes não combustíveis e partículas de carvão não queimado.

Segundo a ASTM C618/2012 [23], 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% [24].

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 [5] 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 [5] descrevem que a casca de 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.

A substituição de pozolanas por materiais constituintes do concreto, não só contribui para a redução dos impactos ambientais, como também melhora as propriedades desse novo material. Desta forma Isaia [20] menciona que as pozolanas são acrescentadas ao concreto de alto desempenho com o objetivo de alcançar uma microestrutura mais compacta e uniforme, o que resulta em um concreto com maior desempenho em relação ao concreto convencional, sem adições, no que se refere à durabilidade, desempenho e vida útil da estrutura de concreto.

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, ABNT NBR 5739 [25], 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 [26].

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 [5], 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 ABNT NBR 5733 [27]. 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 termelétrica de Candiota, ambas foram moídas durante 1 hora em moinho de bolas, por serem disponíveis in natura. Na Tabela 01 estão representadas as características físicas dos materiais cimentícios, e a composição química pode ser observada na Tabela 02.

Para estes materiais foram realizados os seguintes ensaios de caracterização:

- a) Composição química: perda ao fogo, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, SO₃, S, Na₂O,

K2O e Início de pega (Associação Brasileira de Cimento Portland);

b) Massa específica absoluta, através da utilização do frasco volumétrico de Le Chatelier, (NBR NM 23, 2001);

c) Granulometria por difração a laser (ABCP);

d) Determinação da finura (NBR 11579 - 2013);

e) Determinação da água da pasta de consistência normal (NBR NM 43 - 2003);

f) Tempo de início e fim de pega utilizando o aparelho de Vicat (NBR NM 65 - 2003);

g) Resistência à compressão axial da argamassa normal a 3, 7 e 28 dias (NBR 7215-1997)

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	-	-

Tabela 01 (Continuação) - Características físicas dos materiais cimentícios

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

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%	-	-

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, conseqüentemente interferindo positivamente com maior na resistência à compressão do concreto. A CV se classifica como Classe C, conforme classificação apresentada no item 2.

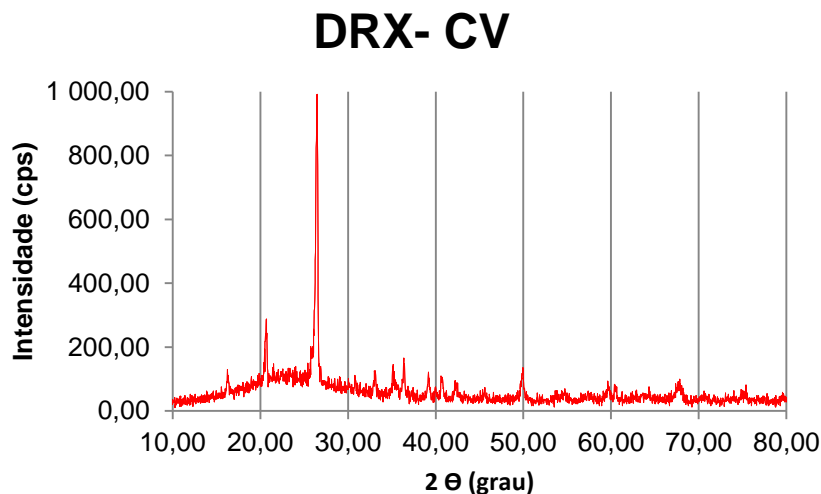


Figura 01 - Difração de Raios X da Cinza Volante

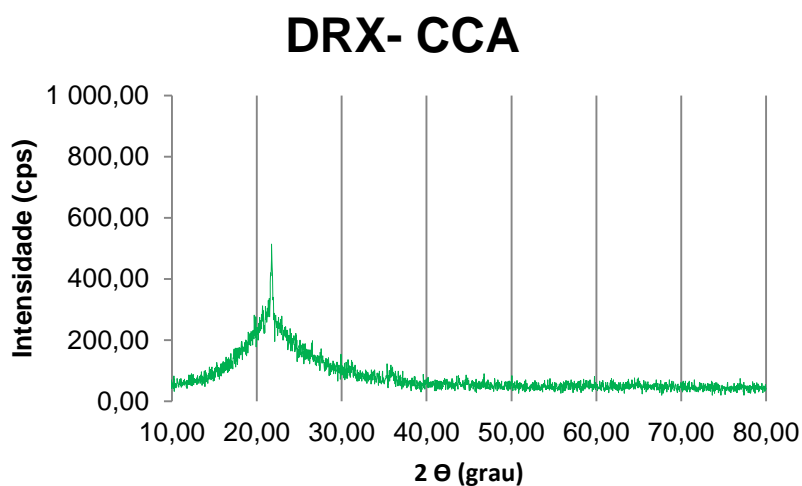


Figura 02 - Difração de Raios X da Cinza de Casca de Arroz

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

Os ensaios realizados para caracterização desses materiais estão apresentados a seguir:

- a) Massa específica e aparente do agregado miúdo (NM 52:2009);
- b) Massa específica e aparente do agregado graúdo e absorção de água (NM 53:2009);
- c) Massa unitária e do volume de vazios de agregados (NM 45:2006);
- d) Índice de forma do agregado graúdo (NBR 7809:2008);
- e) Composição granulométrica (NM 248:2003);

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



Figura 03 - Agregados (areia, brita e RCD)

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 [28]

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 [29]. 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.

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

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, ou seja, os RCD'S permaneciam submersos em água durante 24 horas antes da mistura para a produção do concreto.

3.4 Procedimentos Experimentais

3.4.1 Resistência à Compressão Axial

Os ensaios de resistência à compressão axial obedeceram a ABNT NBR 5738 [25] e ABNT NBR 5739 [24], moldagem e cura dos corpos de prova e ensaio de compressão de corpo de prova cilíndrico, respectivamente. A cura ocorreu em câmara úmida.

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, devido a pesquisa estar inserida em um “Projeto Guarda-Chuva” não houve tempo suficiente para que se ensaiasse aos 91 dias de idade do concreto.

4. Resultados e Discussão

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 04, 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.

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 compacidade, do grau de hidratação e refinamento dos poros. Piasta e Zarzycki (2017) estudaram três relações água/cimento (a/c) 0,25, 0,30 e 0,35, e concluíram que aumentando a relação a/c a resistência à compressão do concreto reduziu em 8% e 13,9% para a/c 0,25-0,30 e a/c 0,30-0,35, respectivamente. No estudo de Girardi [30], com quatro relações a/c diferentes (0,41, 0,51, 0,68 e 1,02), traço em massa de 1:5 e idade de 28 dias do concreto, obteve reduções de resistências com o aumento das relações a/c em 25,75%, 22,80% e 30,46%, respectivamente. Nunes [31] obteve em seus resultados, quando analisou a influência da relação a/c na resistência dos concretos para a idade de 28 dias, um decréscimo de resistência de 44% quando aumentou a relação a/c de 0,4 para 0,6.

Também se percebe 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.

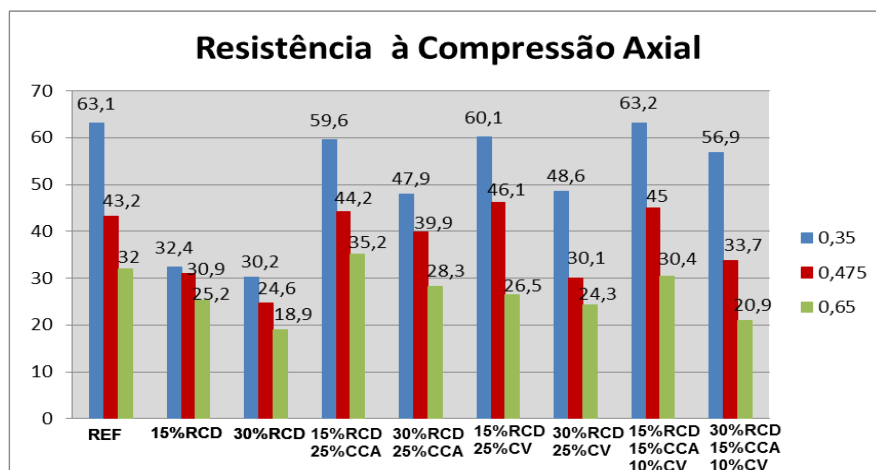


Figura 04 - Resistência à Compressão Axial de todas as misturas estudadas

Quando se substituiu 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. Leite [14] afirma que a maior porosidade e menor resistência mecânica apresentada pelo agregado reciclado quando comparado ao agregado natural propiciam essa diminuição da resistência mecânica do concreto.

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 [32]. 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 RCD, ocorrerão reduções na resistência do concreto, porém, se a matriz for menos resistente que o RCD, o concreto não sofrerá 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. Neste estudo não se mediu a resistência à compressão do RCD, somente é de conhecimento a resistência à compressão do agregado graúdo (174,9 MPa), no entanto, pelos resultados sabe-se que a resistência do agregado reciclado fica abaixo deste valor.

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 se estudaram 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. Kou e Poon [33] afirmam que o aumento da resistência em concretos com agregado reciclado e adição pozolânica se dá pela melhora da microestrutura na zona intersticial, aumentando a ligação entre o novo ligante e os agregados. Da mesma forma, Li et al. [34] apontam que a zona de interface entre o agregado reciclado e a nova pasta de cimento, pode ser melhorada, aumentando sua densidade com a utilização de materiais pozolânicos no entorno dos agregados reciclados, melhorando também a trabalhabilidade do concreto e aumentando a resistência à compressão e flexão.

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 [5] 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 se estudaram 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 [35], 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 [36] 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 04 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

- [1] M. Lewis, P. Conaty, The resilience imperative: cooperative transitions to a steady-state economy, New Society, Gabriola Island, 2012.
- [2] United Nations Environment Programme (UNEP). Annual Report. Parkinsonism & Related Disorders, 21 (5), 2015.
- [3] H. Pollitt, Analysis: Going carbon neutral by 2060 'will make China richer'. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/analysis-going-carbon-neutral-by-2060-will-make-china-richer/> 2021.

- [4] WBCSD. World Business Council for Sustainable Development, Recommendations align with new policy guidelines on EV charging in India. 2022.
- [5] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*, segunda ed, Ed. Nicole Pagan Hasparyk, São Paulo, 2014.
- [6] J.M. Pablos, E.P. Sichiari, Study to reuse an industrial solid waste generated by foundry sands, *Mater. Sci. Eng.*, 4 (2010) 16-25.
- [7] Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA n° 307/2002. <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>, 2002 (acessado 18 junho 2016).
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 15113:2004, Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes–Aterros–Diretrizes para projeto, implantação e operação, 2004.
- [9] S.C. Ângulo, Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento. Tese de Ph.D, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2005.
- [10] R.C.C. Araújo, Avaliação experimental de concretos sustentáveis utilizando resíduo de construção e demolição como agregado graúdo, resíduo de mármore como agregado miúdo e com adição de fibra sintética. Tese de Ph.D., UFV, Viçosa, Brasil, 2015.
- [11] G.L. Vieira, D.C.C. Dal Molin, Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. *Ambiente Construído* 4 (2004) 47-63.
- [12] A.E.B. Cabral, V. Schalch, D.C.C. Dal Molin, J.L.D. Ribeiro. Mechanical Properties Modeling of Recycled Aggregate Concrete. *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 421-430.
- [13] N. Banthia, C. Chan, Use of recycled aggregate in plain and fiber reinforced shotcrete. *Concr. Int.* 22 (2000) 41-45.
- [14] Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021. Cap. 3. 2021. <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2021.pdf> (acessado 08 julho 2022).
- [15] M.B. Leite, Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Tese de Ph.D., UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 2001.
- [16] J.R. Correia, J. Brito, A.S. Pereira, Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates. *Mater. Struct.* 39 (2006) 169-177. <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9014-7>.
- [17] K. Rahal, Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Build. Environ.*, 42 (2007) 407-415.
- [18] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 12653:2015, Materiais pozolânicos — Requisitos, 2015.
- [19] G.C. Isaia, P. Furquim, A.L. Gastaldini, Análise estatística de variáveis influentes na microestrutura e durabilidade de concretos com adições minerais, *Ambiente Construído*, 9 (2009) 07-23.
- [20] G.C. Isaia, Efeito de Misturas Binárias e Ternárias de Pozolanas em Concreto de Elevado Desempenho: Um Estudo com Vistas à Corrosão da Armadura. Tese de Ph.D., USP, São Paulo, SP, Brasil, 1995.
- [21] M. Pires, Caracterização do carvão de Candiota e de suas cinzas visando a avaliação do impacto ambiental e a síntese de zeólitas - relatório final, FAPERGS, Barcelona, 2002.
- [22] C.A.F. Rocha Junior, 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 de M.Sc., UFPA, Belém, PA, Brasil, 2011.
- [23] ASTM International. ASTM C618:2012. Standard Specification for Fly ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, 2012.
- [24] American Concrete Institute (ACI). ACI 232.2R:1996, Manual of Concrete Practice. Use of Fly Ash in Concrete, 1996.
- [25] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 5739: - Concreto - Ensaio de 2007, Compressão de corpos-de-prova cilíndricos, 2007.

- [26] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 5738:2016, Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, 2016.
- [27] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 5733:1991, Cimento Portland de alta resistência inicial, 1991
- [28] BASF Report. Economic, environmental and social performance. http://www.basf.com/documents/corp/en/aboutus/publications/reports/2015/BASF_Report_2014.pdf, 2014 (acessado 12 janeiro 2017).
- [29] P.R.L. Helene, P. Terzian, Manual de dosagem e controle do concreto, Plini, São Paulo, 1992.
- [30] R. Girardi, Avaliação da influência de diferentes parâmetros de dosagem sobre o módulo de deformação do concreto de cimento Portland. Tese de Ph.D., UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 2018.
- [31] F.L. Nunes, Influência da Dosagem na Carbonatação dos Concretos. Dissertação de M.Sc., USP, São Paulo, Brasil, 2005.
- [32] W.T. Sami, S.A. Akmal, Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete, *Constr. Build Mater.*, 23 (2009) 1163–1167.
- [33] 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. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.011>.
- [34] J. Li, H. Xiao, Y. Zhou, Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*, 23 (2009) 1287–1291.
- [35] G.C. Isaia, 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.
- [36] F. Zunino, M. Lopez, Decoupling the physical and chemical effects of supplementary cementitious materials on strength and permeability. A multilevel approach, *Cem. Concr. Compos.*, 65 (2016) 19-28.

ORCID

C.C. Santos 0000-0002-0988-2682 (<https://orcid.org/0000-0002-0988-2682>)

G.C. Isaia 0000-0003-0653-1227 (<https://orcid.org/0000-0003-0653-1227>)