

Materiais alternativos para concretos de cimento Portland

Alternative materials for Portland cement concretes

Materiales alternativos para hormigones de cemento Portland

Matériaux alternatifs pour le béton de ciment Portland

Resumo

A construção civil no Brasil é responsável por 14% do Produto Interno Bruto (PIB), mas, por sua vez, gera consideráveis impactos ambientais, tanto pelo consumo de recursos naturais (cerca de 20 a 50% do consumo total) como pela geração de resíduos. A presente pesquisa visa a 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 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, com relações água/materiais cimentícios (a/mc) de 0,35; 0,475 e 0,65. Também foi analisada a intensidade dos ligantes e todos os resultados foram validados pela ANOVA. Pôde-se perceber pelos resultados que, em relação ao traço referência (sem substituições), os concretos com pozolanas em misturas ternárias obtiveram traços de resistência à compressão axial bem próximos do traço referência.

Palavras-chave: Concreto. RCD. Pozolanas. Resistência à compressão axial.


Abstract


Civil construction in Brazil is responsible for about 14% of the Gross Domestic Product (GDP), but in turn, it generates considerable environmental impacts, both for the consumption of natural resources (about 20 to 50% of total consumption) and the generation of waste. 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 ternary mixtures. For axial compressive strength tests cylindrical test specimens were molded and cured in a humid chamber for a period of 28 days with a / mc ratio of 0.35; 0.475 and 0.65. Binding intensities were also analyzed and all results were validated by ANOVA. From the results, it was possible to observe that in relation to the reference line (without substitutions), concrete with pozzolans in ternary mixtures obtained resistance to axial compression very close to the reference line.

Keywords: Concrete. RCD. Pozzolans. Resistance to axial compression.

Resumen

La construcción civil en Brasil es responsable por un 14% del Producto Interno Bruto (PIB), sin embargo, genera considerables impactos ambientales, tanto por el consumo de recursos naturales (de 20 a 50% del consumo total), como por la generación de residuos. La presente investigación busca analizar mezclas de hormigones con agregado residual de construcción y demolición (RCD) por medio de ensayos de resistencia a la compresión axial. Los hormigones estudiados fueron moldeados con sustitución de dos niveles de agregado residual, el cemento también fue sustituido parcialmente por dos tipos de puzolanas en mezclas ternarias. Para los ensayos de resistencia a la compresión axial fueron moldeados

Cristiane Carine dos Santos 
cristianecdossantos@hotmail.com
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Geraldo Cechella Isaia 
geraldoisia@gmail.com
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

cuerpos de prueba cilíndricos y cuadrados en cámara húmeda por un período de 28 días con relación a/mc de 0,35; 0,475 y 0,65. También fue analizada la intensidad de ligantes y todos los resultados fueron validados por ANOVA. Con estos resultados se percibió que, en relación al trazo referencia (sin sustituciones), los hormigones con puzolanas en mezclas ternarias obtuvieron resistencia a la compresión axial muy cercana del trazo referencia.

Palabras-clave: Hormigón. RCD. Puzolanas. Resistencia a la compresión axial.

Résumé

La construction civile au Brésil est responsable d'environ 14% du produit intérieur brut (PIB). Néanmoins, elle génère des impacts environnementaux considérables, soit pour la consommation de ressources naturelles (environ 20 à 50% de la consommation totale) soit pour la génération de déchets. La présente recherche vise à analyser les mélanges de béton avec des résidus de construction et de démolition (RCD) à travers des essais de résistance à la compression axiale. Les bétons étudiés ont été modélés avec le remplacement de deux teneurs en agrégats résiduels, le ciment a également été partiellement remplacé par deux types de pouzzolanes en mélanges ternaires. Pour les essais de résistance à la compression axiale, des éprouvettes cylindriques ont été modélés et durcis dans une chambre humide pendant une période de 28 jours avec un rapport a / mc de 0,35 ; 0,475 et 0,65. Les intensités des liants ont également été analysées et tous les résultats ont été validés par l'ANOVA. Les résultats ont permis de constater que par rapport à la ligne de référence (sans substitutions), les bétons à pouzzolanes en mélanges ternaires ont eu une résistance à la compression axiale très proche de la ligne de référence.

Mots clés: Béton. RCD. Pouzzolanes. Résistance à la compression axiale.

1 Introdução

O crescente aumento do consumo dos recursos naturais em nível mundial gera grandes preocupações em relação ao meio ambiente, principalmente à poluição do ar e da água, à contaminação do solo, à escassez de recursos não renováveis e a mudanças climáticas, tornando a sustentabilidade um assunto em destaque quanto à qualidade de vida e sobrevivência dos seres vivos.

A partir do Relatório *Brundtland*, elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento no ano de 1987, definiu-se o desenvolvimento sustentável como a maneira que as gerações atuais conseguem satisfazer suas necessidades, sem comprometer que as futuras gerações também consigam satisfazer suas próprias necessidades (UNEP; SETAC, 2007), o que despertou preocupações com a escassez dos recursos naturais e a busca por maiores conhecimentos sobre essa realidade.

Um marco da história que impulsionou fortemente os impactos prejudiciais ao meio ambiente foi a Revolução Industrial no século XVIII, em que se buscou favorecer a qualidade de vida humana, refletindo no meio ambiente, mais especificamente na relação homem x natureza. A partir desse acontecimento, a construção civil também alavancou, principalmente, com a descoberta do cimento Portland, contribuindo ainda mais para a exploração de recursos naturais e emissão de poluentes.

Com o intuito de reduzir os impactos causados ao meio ambiente devido às atividades humanas, grande parte dos segmentos da sociedade têm 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. Nesse contexto, surgiram inúmeras pesquisas objetivando substituir recursos naturais por materiais alternativos, entre eles a reutilização de resíduos de construção e demolição (RCD) gerados pela própria construção civil, bem como o uso de resíduos agroindustriais, como cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana, cinza volante, entre outros materiais. A partir da aplicação desses estudos, haveria a possibilidade de prolongar por um maior período de tempo o ciclo de vida dos recursos naturais que são utilizados em grande quantidade pela construção civil.

Com o aumento da produção de concreto, conseqüentemente sobe o consumo de cimento Portland, que é um dos seus principais materiais constituintes e que mais polui o meio ambiente. A indústria cimenteira é considerada pelo Portal Odm-Fiep (2012) o setor responsável por cerca de 5% das emissões de CO₂ lançadas na atmosfera, entretanto, conforme o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), pode-se considerar que mais de 50% das emissões de CO₂ pela indústria de cimento deve-se aos processos de produção, ocorrendo durante a transformação físico-química do calcário em clínquer, que é o principal constituinte do cimento. Dessa forma, as altas emissões geradas ocorrem devido à participação do calcário em sua produção, já que parte dele se transforma em CO₂.

A intensa demanda por concreto tem como consequência o enorme consumo de cimento, que é um dos seus principais constituintes. Os dados apresentados pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (BRASIL, 2015) apontam que a quantidade de cimento consumida no ano de 2014 teve um aumento de 1,8% em relação ao ano anterior, chegando a uma margem de 350 kg de cimento por habitante.

Nos últimos anos, a indústria da construção civil tem buscado, de maneira constante e bastante insistente, utilizar 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 (2015) como materiais silicosos ou silicoaluminosos, que possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas, quando divididas e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

Existem alguns estudos sobre a utilização de adições minerais com o intuito de reduzir o impacto ambiental global por meio da redução das emissões de CO₂, pois, além de diminuir os custos quando incorporadas ao cimento Portland, também melhoram as propriedades do concreto e contribuem para a sustentabilidade. Dessa forma, Mehta e Monteiro (2008) afirmam que as adições minerais melhoram as propriedades do concreto, como a microestrutura, reduzem a segregação e a 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.

A indústria da construção civil é um dos setores mais importantes para o desenvolvimento econômico e social de um país. No Brasil, é responsável por 14% do Produto Interno Bruto (PIB), mas, por sua vez, gera consideráveis impactos ambientais, tanto pelo consumo de recursos naturais (cerca de 20 a 50% do consumo total) como pela geração de resíduos (PAZ; LAFAYETTE, 2016).

Este trabalho teve como objetivo geral estudar o comportamento da resistência à compressão axial do concreto diante da substituição parcial do agregado graúdo pelo RCD e do cimento por adições minerais para maior sustentabilidade.

2 Metodologia

2.1 Materiais

2.1.1 Materiais cimentícios

Foi utilizado o cimento Portland CPV-ARI da marca Itambé, produzido em território nacional, conforme a norma NBR 5733: 1991. Como substituição parcial do cimento, utilizou-se cinza de casca de arroz (CCA), proveniente da região de Santa Maria – RS, sendo queimada a céu aberto (sem controle de temperatura), e também a cinza volante (CV) proveniente da usina termoelétrica de Candiota. Ambas foram moídas durante 1 hora em moinho de bolas.

2.1.2 Agregados

Utilizaram-se agregados graúdos e miúdos. Como agregado graúdo empregou-se brita com fração retida entre as peneiras 19 e 4,8mm, proveniente da cidade de Itaara – RS. E como substituição parcial desse

agregado utilizou-se resíduos de construção e demolição (RCD) provenientes da empresa GR2, de Santa Maria – RS. Utilizou-se areia com granulometria entre 4,8 e 0,15mm do rio Vacacaí, de Santa Maria – RS, como agregado miúdo.

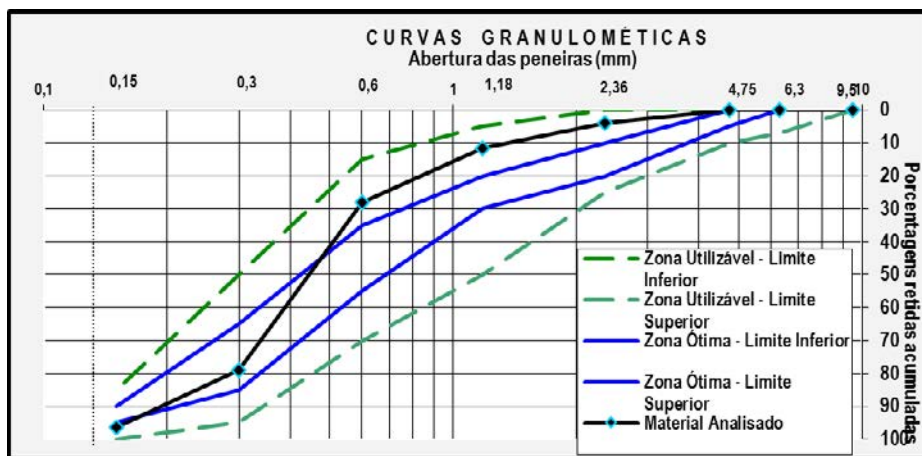
Na Tabela 1 está representada a caracterização física dos agregados, e nas Figuras 1, 2 e 3 as curvas granulométricas do agregado miúdo, graúdo e RCD, respectivamente.

Tabela 1 – Características físicas do agregado miúdo, graúdo e de RCD

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

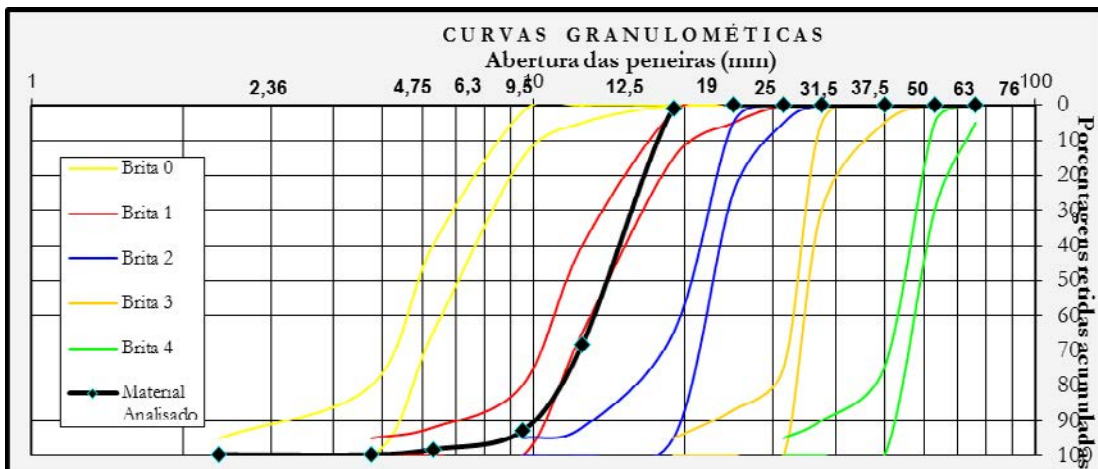
Fonte: Elaboração própria (2019).

Figura 1 – Curva granulométrica do agregado miúdo



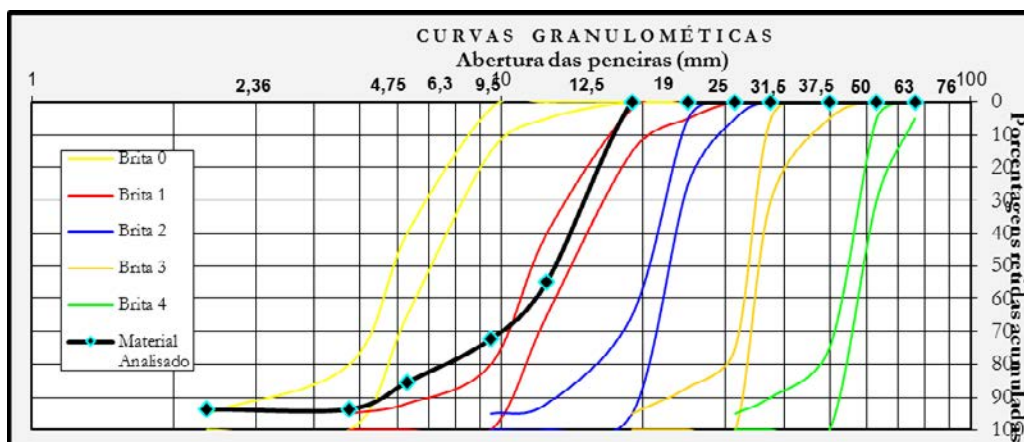
Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Figura 2 – Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Figura 3 – Curva granulométrica de RCD



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Os RCD foram primeiramente classificados, antes de serem britados, separando-se os materiais que poderiam substituir o agregado graúdo (como pedaços de concreto, argamassa e cerâmica), sendo que os demais (como madeira, plástico, gesso, papéis, entre outros) foram descartados. Na Tabela 2 estão as porcentagens de cada um desses materiais. O emprego dos RCD ao concreto deu-se com superfície saturada seca (SSS) devido a sua alta capacidade de absorção de água.

Tabela 2 – Classificação dos RCD em porcentagem

Classificação dos RCD (%)		
Concreto, argamassa e cerâmica	Piso cerâmico	Outros
92,82	3,44	3,74

Fonte: Elaboração própria (2019).

2.1.3 Aditivo químico redutor de água

Com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade do concreto, utilizou-se aditivo hiperplastificante MasterGlenium 54, fornecido pela BASF obedecendo às prescrições das normas ABNT 10908:2009 e NBR 11768:2011.

2.1.4 Dosagem do concreto

O estudo de dosagem do concreto foi realizado de acordo com o método proposto por Helene e Terzian (1992), em que foi fixada a resistência característica para o concreto de 25 MPa. Devido à diminuição da resistência à compressão axial do concreto obtida em ensaios preliminares pelos traços com substituições por 15 e 30% de RCD, empregaram-se pozolanas para tentar compensar essa queda. Além das moldagens com o cimento CP V-ARI, foram produzidos concretos com o cimento CP IV. Para obter a curva de Abrams, adotaram-se três relações água/materiais cimentícios (a/mc) (0,35; 0,475 e 0,65) e abatimento do tronco de cone de 100 ± 20 mm. Ainda, para melhorar a consistência do concreto, utilizou-se aditivo redutor de água em algumas misturas.

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 preliminares para possibilitar a realização dos cálculos dos traços unitários de concreto para cada relação água/materiais cimentícios (a/mc). De acordo com a ABNT NBR 12655: 2015, adotou-se desvio padrão de $S_d = 4$ MPa, determinando, assim, para a resistência característica estabelecida ($f_{ck} = 25$ MPa), a resistência aos 28 dias de $f_{28} = 31,6$ MPa. Para possibilitar o

traçado da curva de Abrams, foram ensaiados os traços de concreto para as três relações água/materiais cimentícios (a/mc) diferentes, através da moldagem de quatro corpos de prova cilíndricos de 10x20 mm para cada um dos traços de concreto. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram levados à câmara úmida para serem curados durante 28 dias, conforme prescreve a norma ABNT NBR 5738: 2016. Depois do período de cura, foram retificados e submetidos aos ensaios de resistências à compressão axial, de acordo com a norma ABNT NBR 5739: 2007. As Tabelas 3 e 4 demonstram a quantidade de materiais por m³ dos traços estudados.

Tabela 3 – Quantidade de materiais por m³ dos traços de referência

TRAÇO REFERÊNCIA X=0,35		TRAÇO REFERÊNCIA X=0,475		TRAÇO REFERÊNCIA X=0,65	
Cimento	512,74	Cimento	374,91	Cimento	272,63
Areia	579,40	Areia	708,58	Areia	804,25
Brita	1092,14	Brita	1083,48	Brita	1076,87
Água	179,46	Água	178,08	Água	177,21

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 4 – Quantidade de materiais por m³ dos traços contendo RCD, CCA e CV

X=0,35		X=0,475		X=0,65	
15%RCD + 15%CCA +10%CV					
Cimento	504,16	Cimento	368,75	Cimento	268,16
Areia	519,29	Areia	660,06	Areia	764,25
Brita	912,53	Brita	907,12	Brita	901,01
Água	176,46	Água	175,16	Água	174,30
CCA	75,62	CCA	55,31	CCA	40,22
CV	50,42	CV	36,87	CV	26,82
RCD	161,33	RCD	158,56	RCD	158,21
30%RCD + 15%CCA +10%CV					
Cimento	495,89	Cimento	249,56	Cimento	181,70
Areia	510,76	Areia	446,72	Areia	517,84
Brita	738,87	Brita	511,60	Brita	1006,61
Água	173,56	Água	118,54	Água	118,10
CCA	74,38	CCA	37,43	CCA	27,25
CV	49,59	CV	24,96	CV	18,17
RCD	317,37	RCD	431,74	RCD	430,63

Fonte: Elaboração própria (2019).

2.2 Resistência à compressão axial do concreto

Os ensaios de compressão axial foram executados com aplicação da força centrada no topo e na base dos modelos, a uma taxa de 0,5 KN/seg.

O valor da resistência à compressão axial será obtido colocando os corpos de prova em uma prensa com capacidade de 200 toneladas, sendo o resultado de ruptura indicado no próprio sistema, seguindo a norma ABNT NBR 5739: (2007) para o ensaio de compressão axial dos corpos de prova.

2.3 Intensidade dos ligantes

Buscando a diminuição mundial de clínquer, deve-se prezar pela diminuição do consumo total de ligantes. Por essa razão, propõe-se um segundo indicador de eficiência ambiental do concreto: a intensidade de ligantes (IL), que relaciona o consumo total de ligantes do concreto (impacto), em kg.m^3 , com a resistência à compressão (desempenho), em MPa, conforme a Equação 1.

$$IL = l/rc \quad \text{Equação (1)}$$

Onde l é o consumo total de ligantes do concreto, em kg.m^3 , e rc é o requisito de desempenho – resistência à compressão axial aos 28 dias.

Quanto maior o IL, maior o teor de ligantes necessários para a realização da mesma função e, portanto, menor a ecoeficiência do concreto.

2.4 Análises estatísticas

Para maior confiabilidade nos dados, realizou-se um tratamento estatístico dos resultados de resistência à compressão axial e de intensidade dos ligantes por meio da aplicação de análise de variância (ANOVA), com 95% de confiabilidade dos resultados adquiridos. O objetivo principal da análise da variância foi verificar o nível de significância entre grupos, isto é, se existem diferenças significativas entre médias de grupos diferentes. Os dados são lançados em programas computacionais, que apresentam a soma, a média e a variância, como também a soma dos quadrados, os graus de liberdade, as médias quadráticas e o teste F. É comparado o valor F com o F crítico ou tabelado. Se F for maior que o valor tabelado, conclui-se que existem diferenças significativas entre os grupos, isto é, os fatores que estão sendo comparados possuem influência no resultado que está sendo analisado. Os grupos são analisados quanto aos traços de concreto, referência (sem substituição de RCD) e substituição de 15 e 30% de RCD, em que se busca verificar se existe significância entre eles em relação à resistência à compressão axial, intensidade dos ligantes com consumo total dos ligantes e também apenas com consumo de cimento.

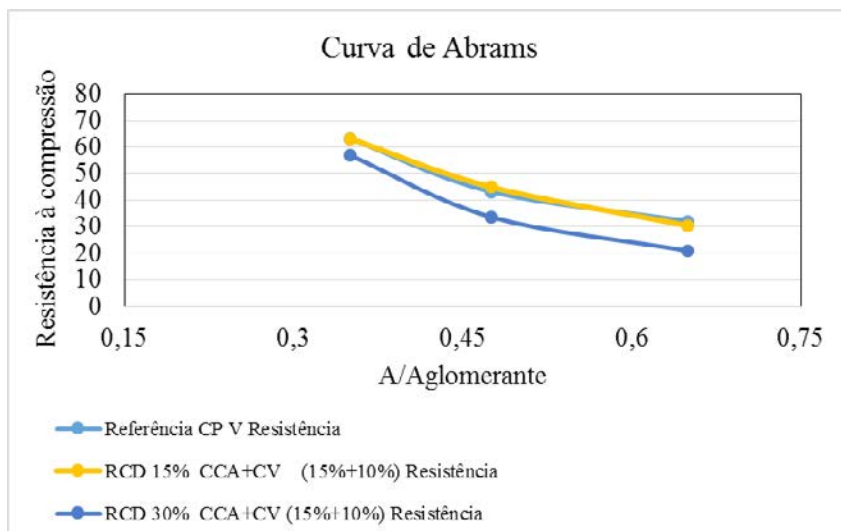
3 Resultados e discussões

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios obtidos no programa experimental.

3.1 Resistência à compressão axial do concreto

Para possibilitar o traçado da curva de Abrams, foram ensaiados os traços de concreto para as três relações água/materiais cimentícios (a/mc) diferentes através da moldagem de quatro corpos de prova cilíndricos de 10x20 mm para cada um dos traços de concreto. Após o rompimento dos corpos de prova, houve a possibilidade do traçado da curva de Abrams, demonstrado na Figura 4.

Figura 4 – Curva de Abrams



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

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 Tabela 5, 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 ternárias.

Tabela 5 – Resultados da resistência à compressão axial aos 28 dias

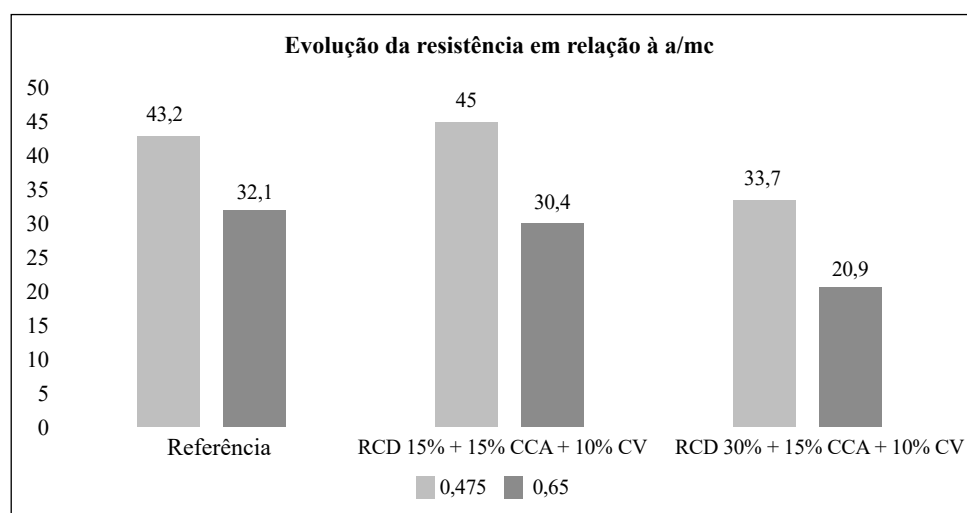
Referência CP V	
<i>a/mc</i>	Resistência (MPa)
0,35	63,1
0,475	43,2
0,65	32,1
RCD 15% CCA+CV (15%+10%)	
<i>a/mc</i>	Resistência (MPa)
0,35	63,2
0,475	45,0
0,65	30,4
RCD 30% CCA+CV (15%+10%) (MPa)	
<i>a/mc</i>	Resistência
0,35	56,9
0,475	33,7
0,65	20,9

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Com base nos resultados de resistência a compressão axial, obtidos aos 28 dias, pode-se afirmar, de forma geral, que a mistura com 15% de RCD, 15% de CCA e 10% de CV com um fator *a/c* de 0,475 apresentou melhor desenvolvimento em relação à mistura de referência, assim como quando comparadas as misturas com as devidas substituições. Pode-se observar que, conforme se aumentou para 30% a substituição do agregado diminuiu-se a resistência para todas as relações *a/c*, devido à alta absorção que esse agregado possui, aumentando sua porosidade.

Outra propriedade do concreto que também sofre modificação com a utilização do agregado reciclado é a massa específica. Nos estudos realizados por Poon e Chan (2006) percebe-se que, conforme o teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados aumenta, ocorre uma diminuição gradual da massa específica do concreto estudado. Silva *et al.* (2015) atribuem essa redução à maior porosidade do agregado reciclado, principalmente com teores crescentes de substituições. A figura 5 demonstra a evolução de resistência em relação à a/c.

Figura 5 - Evolução da resistência em relação à a/mc



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

A Tabela 6 e a Tabela 7 apresentam, respectivamente, o resumo e as análises dos resultados de compressão axial feitos pela ferramenta ANOVA.

Tabela 6 – Resumo da resistência à compressão axial

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	3	138,40	46,13	246,70
RCD 15%	3	138,60	46,20	270,04
RCD 30%	3	111,50	37,17	333,01

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Tabela 7 – Dados ANOVA de compressão axial

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	162,01	2	81,00	0,29	0,76	5,14
Dentro dos grupos	1699,51	6	283,25			
Total	1861,52	8				

SQ= soma dos quadrados. gl= graus de liberdade. MQ= quadrados médios

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

A ANOVA confirmou que não houve diferenças significativas entre as resistências à compressão axial, demonstrando que o agregado reciclado não incrementou, com significância, a resistência à compressão axial.

3.2 Intensidade dos ligantes

É a quantidade de ligantes (impacto) necessária para produzir uma unidade de resistência (desempenho). A Tabela 8 apresenta a intensidade total de ligantes das misturas e a Tabela 11, a intensidade de ligantes em relação ao consumo de cimento.

Tabela 8 – Intensidade dos ligantes com consumo total de ligantes

Referência CP V	
a/mc	Intensidade dos ligantes
0,35	8,13 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,475	8,68 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,65	8,49 kg.m⁻³.MPa⁻¹
RCD 15% CCA+CV (15%+10%)	
a/mc	Intensidade dos ligantes
0,35	9,97 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,475	10,24 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,65	11,03 kg.m⁻³.MPa⁻¹
RCD 30% CCA+CV (15%+10%)	
a/mc	Intensidade dos ligantes
0,35	10,89 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,475	9,26 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,65	10,87 kg.m⁻³.MPa⁻¹

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Pode-se identificar, levando em consideração o consumo total de ligantes, que a mistura com 15% de RCD, 15% de CCA e 10% de CV com fator a/c de 0,65 apresentou a maior quantidade de ligante (impacto).

A Tabela 9 e a Tabela 10 apresentam, respectivamente, o resumo e as análises dos resultados do consumo total de ligantes feitas pela ferramenta ANOVA.

Tabela 9 – Resumo da intensidade dos ligantes com consumo total de ligantes

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
	3	1,48	0,49	0,02
Referência	3	25,30	8,43	0,08
RCD 15%	3	31,24	10,41	0,30
RCD 30%	3	31,02	10,34	0,87

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Tabela 10 – ANOVA de intensidade dos ligantes com consumo total de ligantes

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	199,55	3	66,52	208,01	0,00	4,07
Dentro dos grupos	2,56	8	0,32			
Total	202,10	11				

SQ= soma dos quadrados. gl= graus de liberdade. MQ= quadrados médios

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Tabela 11 – Intensidade dos ligantes apenas com consumo de cimento

Referência CP V	
a/mc	Intensidade dos ligantes
0,35	8,13 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,475	8,68 kg/m³.MPa
0,65	8,49 kg/m³.MPa
RCD 15% CCA+CV (15%+10%)	
a/mc	Intensidade dos ligantes
0,35	7,98 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,475	8,19 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,65	8,82 kg.m⁻³.MPa⁻¹
RCD 30% CCA+CV (15%+10%)	
a/mc	Intensidade dos ligantes
0,35	8,72 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,475	7,41 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,65	8,69 kg.m⁻³.MPa⁻¹

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Observa-se que o melhor desempenho apresentado foi na mistura com 30% de RCD, 15% de CCA e 10% de CV com fator a/c de 0,475, com uma intensidade de ligante inferior à mistura de referência em aproximadamente 15%. A maior intensidade de ligante pode ser verificada na mistura com 15% de RCD, 15% de CCA e 10% de CV com um fator a/c de 0,65, com uma intensidade de ligante superior à mistura de referência em aproximadamente 4% na Tabela 11.

A Tabela 12 e a Tabela 13 apresentam, respectivamente, o resumo e as análises dos resultados de total de ligantes feitas pela ferramenta ANOVA.

Tabela 12 – Resumo da intensidade dos ligantes apenas com consumo de cimento

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
	3	1,48	0,49	0,02
Referência	3	25,30	8,43	0,08
RCD 15%	3	24,99	8,33	0,19
RCD 30%	3	24,82	8,27	0,56

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Tabela 13 – ANOVA de intensidade dos ligantes apenas com consumo de cimento.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	138,83	3	46,28	217,49	0,00	4,07
Dentro dos grupos	1,70	8	0,21			
Total	140,53	11				

SQ= soma dos quadrados. gl= graus de liberdade. MQ= quadrados médios

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

4 Conclusão

Foram analisadas misturas de concreto com teores de substituição do cimento por cinza de casca de arroz (CCA) e cinza volante (CV), assim como o agregado natural por resíduos de construção e demolição (RCD), a fim de avaliar a resistência à compressão axial aos 28 dias e a intensidade de ligantes em relação ao consumo total de materiais e somente do cimento, com o intuito de reduzir seu uso, tornando tais misturas menos agressivas ao meio ambiente.

Através das análises dos resultados pode-se concluir que é possível obter a resistência desejada utilizando misturas com adições minerais e RCD aos 28 dias de idade.

A resistência à compressão axial apresentou melhor desempenho na mistura com 15% de RCD, 15% de CCA e 10% de CV, com um fator a/c de 0,475. Já em relação à intensidade de ligantes, verificou-se que a mistura que apresentou o melhor desempenho foi com 30% de RCD, 15% de CCA e 10% de CV, com fator a/c de 0,475, pois obteve o menor valor de IL, ou seja, $7,41 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{MPa}^{-1}$. Tais afirmações podem ser comprovadas pela ferramenta ANOVA.

Contudo a utilização desse material como forma de substituição parcial do agregado natural para a produção de concreto exige amplos conhecimentos sobre as suas propriedades, bem como das consequências quando inserido ao novo material. Nesse contexto, aprofundar os conhecimentos e explorar as propriedades resultantes desse concreto, tanto no estado fresco como no endurecido, são fatores básicos que orientam a utilização desse produto.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto: ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10908**: aditivos para argamassa e concreto: ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: concreto de cimento portland. Preparo, controle e recebimento: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: materiais pozolânicos: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: aditivos químicos para concreto de cimento portland: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- BRASIL. **Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil**. 2015. Disponível em: www.caixa.gov.br/sinapi. Acesso em: 15 jul. 2018.
- DAMINELLI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 32, n. 8, p. 555-562, 2010.
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo, 1992.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

PAZ, D. H. F.; LAFAYETTE, K. P. V. Forecasting of construction and demolition waste in Brazil. **Waste Management & Research**. [S. l.], v. 34 ,n. 8, p. 708-716, 2016.

POON, C. S.; CHAN, D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 50, n. 3, p.293-305, May, 2007.

PORTAL ODM. **Acompanhamento municipal dos objetivos de desenvolvimento do milênio**. Disponível em: www.portalodm.com.br/FIEP. Acesso em: 15 de jun. 2018.

REMMEN, A.; *et al.* **Life cycle management: a business guide to sustainability**. Paris: UNEP, 2007. 51p.

SILVA, R. B. D.; ANGULO, S. C.; PILEGGI, R. G.; SILVA, C. O. Dry cost concretes produced with density-separated-crushed-CDW recycled aggregates. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 15, n. 4, p. 335-349, 2015.

THE ROLE of cement in the 2050 low carbon economy. Bruxelas: Cembureau, 2013. 64 p.

Sobre os autores

Cristiane Carine dos Santos

Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2020. Mestrado Acadêmico pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 2017. Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Unijuí), 2010. Atua como professora na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), *campus* Cachoeira do Sul, e como autônoma em obras de construção civil, projeto e execução.

Geraldo Cechella Isaia

Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo (USP), 1995. Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 1990. Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 1965. É professor titular aposentado desde 1995, assim também como professor associado desde 2013 pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Professor permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Recebido em: 07.11.2019

Aceito em: 10.03.2020