

Eixo Temático: Inovação e Sustentabilidade

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE DO
CONCRETO SUBSTITUINDO CIMENTO POR POZOLANAS TENDO EM VISTA A
SUSTENTABILIDADE**

**ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF CONCRETE
REPLACING CEMENT BY POZOLANAS WITH A VIEW TO SUSTAINABILITY**

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

RESUMO

A produção mundial de cimento é responsável por, aproximadamente, de 5% a 8% das emissões de gás carbônico (CO₂) antropogênico (CEMBUREAU, 2013; IPCC, 2014), superando o consumo de alimentos, o que dá a dimensão do seu enorme consumo como material de construção para todo e qualquer ambiente construído. Sabendo-se das propriedades do concreto, uma boa possibilidade que o mesmo proporciona, tendo em vista a sustentabilidade, é a substituição parcial do cimento por pozolanas, como, por exemplo, cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa, contribuindo com uma possível redução do dióxido de carbono (CO₂) liberado no processo produtivo do clínquer e a diminuição dos descartes indevidos, além do mais, podem melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, através do efeito pozzolânico e físico. A presente pesquisa visa verificar a eficiência da substituição do cimento por estas três pozolanas, tendo em vista a resistência à compressão axial e a durabilidade do concreto. Realizaram-se ensaios de resistência à compressão axial, espessura de carbonatação em ambiente natural e difração de raios X. Em ambos os ensaios utilizou-se dois percentuais de substituição do cimento em massa: 15% e 30%, de tal maneira, todas as substituições apresentarem viabilidade técnica em relação à resistência a compressão axial, porém, quando se diz respeito à carbonatação, são necessários estudos mais aprofundados a respeito.

Palavras-chave: cimento, concreto, pozolanas, propriedades, sustentabilidade.

ABSTRACT

World cement production accounts for approximately 5% to 8% of anthropogenic carbon dioxide (CO₂) emissions (CEMBUREAU, 2013, IPCC, 2014), exceeding food consumption, which gives the size of its enormous Consumption as a building material for any and all built environment. Knowing the properties of the concrete, a good possibility that it provides, with a view to sustainability, is the partial replacement of cement by pozzolans, such as fly ash, rice husk ash and active silica, contributing with A possible reduction of the carbon dioxide (CO₂) released in the production process of the clinker and the reduction of the undue discards, in addition, the mechanical properties and durability of the concrete can be better, through the pozzolanic and physical effect. The present research aims to verify the efficiency of the cement substitution by these three pozzolans, considering the axial compressive strength and the durability of the concrete. Tests of resistance to axial compression, carbonation thickness in natural environment and X-ray diffraction were carried out. In both tests, two percentages of cement replacement by mass were used: 15% and 30%, in such a way, all the Substitutions are technically feasible in relation to axial compressive strength, however, when it comes to carbonation, further studies are required.

Keywords: cement, concrete, pozzolanas, properties, sustainability.

1 INTRODUÇÃO

O relatório da ONU (2016) relata que a população está em constante crescimento, e que a mesma aumentará aproximadamente 32% até o ano de 2050, atingindo aproximadamente a marca de 9,7 bilhões de habitantes. Já a construção civil deverá crescer cerca de 2,5 vezes em relação ao nível mundial até o mesmo ano (AGOPYAN E JOHN, 2011). Este ciclo de crescimento resultará em problemas ambientais, tais como, o aquecimento global, poluição do ar, da água e dos solos, destruição de ecossistemas e esgotamento de recursos naturais.

A construção civil destaca-se neste cenário devido ao grande consumo de cimento. No Brasil, por exemplo, 2015, foram produzidas 71,7 milhões de toneladas (SNIC, 2015). A produção mundial de cimento é responsável por, aproximadamente, de 5% a 8% das emissões de gás carbônico (CO₂) antropogênico (CEMBUREAU, 2013; IPCC, 2014), superando o consumo de alimentos, o que dá a dimensão do seu enorme consumo como material de construção para todo e qualquer ambiente construído.

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, como, por exemplo, cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa, contribuindo com uma possível redução do dióxido de carbono (CO₂) liberado no processo produtivo do clínquer e a diminuição dos descartes indevidos.

Tendo em vista o exposto, observa-se que o Brasil é um grande produtor mundial de arroz, bem como, possui um significativo número de termelétricas e siderúrgicas, que dão origem, respectivamente, a cinza de casca de arroz, a cinza volante e a sílica ativa, havendo assim, a necessidade de um destino adequado a estes rejeitos. Busca-se a atenuação da poluição indevida por estes materiais, tendo, como um dos principais meios a larga utilização na construção civil, levando assim, a estudos de viabilidade técnica.

2 POZOLANAS

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

Deste modo, acrescentando ao cimento um material pozolânico, com os óxidos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ presentes em estado amorfo ou com sua estrutura cristalina fraca, em presença de água e à temperatura ambiente, estes óxidos reagem com o hidróxido de cálcio (produzido pela hidratação dos silicatos do cimento Portland) formando compostos que possuem propriedades aglomerantes.

A 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

3.1 VARIÁVEIS

A definição das variáveis está ligada a um estudo mais amplo do comportamento do concreto. A Tabela 01 mostra o traço, fator água/aglomerante e o teor de argamassa utilizados para moldagem de todos os corpos de prova, já a Tabela 02 diz respeito à porcentagem de substituição de pozolana ao concreto, bem como, quantos corpos de prova foram rompidos por idade no ensaio de Resistência a Compressão Axial. Realizou-se ensaio de Espessura de Carbonatação de acordo com a Tabela 03 e posteriormente Difração de Raios X conforme a Tabela 04.

Tabela 01 – Traço, fator água/aglomerante e teor de argamassa

Traço	Fator Água/ Aglom.	Teor de Argamassa
1:5	0,55	0,51

Tabela 02 – Relação de corpos de prova para ensaio de compressão por idade

Idade (dias)	Cinza de Casca de		Cinza Volante		Sílica Ativa		Referência
	15%	30%	15%	30%	15%	30%	-
	Nº CPs		Nº CPs		Nº CPs		Nº CPs
3	3	3	3	3	3	3	3
7	3	3	3	3	3	3	3
28	3	3	3	3	3	3	3
56	3	3	3	3	3	3	3
63	3	3	3	3	3	3	3
91	3	3	3	3	3	3	3
126	3	3	3	3	3	3	3

Tabela 03 – Idades para leitura da espessura de carbonatação dos cp's em ambiente natural

Idade (dias)	CV, CCA, SA		Referência
	15%	30%	-
	Condições Naturais (Ambiente)		Condições Naturais (Ambiente)
	Nº Corpos de Prova		Nº Corpos de Prova
3	01 (a)	01 (b)	01 (c)
7	01 (a)	01 (b)	01 (c)
28	01 (a)	01 (b)	01 (c)
56	01 (a)	01 (b)	01 (c)

NOTA: (a), (b) e (c) indicam que as leituras nas diferentes idades foram realizadas no mesmo corpo de prova.

Tabela 04 – Idades em que serão realizados ensaios de difração de raios x de corpos de prova apresentados na tabela 03

Cinza de Casca de		Cinza Volante		Sílica Ativa		Referência
15%	30%	15%	30%	15%	30%	-
Idade (dias)						
7, 28, 56						

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1 Materiais Cimentícios

Foram utilizados quatro tipos de materiais cimentícios: cimento CP V – ARI, cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa.

O cimento utilizado CP V – ARI, de alta resistência inicial é de fabricação nacional, marca Itambé, de acordo a norma ABNT NBR 5733(1991). O mesmo apresenta baixo teor de adições minerais em sua composição, de tal maneira, permitindo a verificação da influência da substituição parcial do cimento Portland por pozolanas, no caso, cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa. As Tabelas 05 e 06 apresentam a caracterização química e física dos materiais cimentícios, respectivamente.

Tabela 05 – Caracterização química dos materiais cimentícios

Composição química	CP V - ARI	CV	CCA	SA
Perda ao fogo - PF	3,08	1,00	0,25	2,32
Dióxido de Silício total - SiO ₂	18,81	65,50	94,84	95,10
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃	4,75	25,89	0,39	0,09
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃	2,68	3,15	0,54	0,10
Óxido de Cálcio total - CaO	60,88	0,34	1,32	0,24
Óxido de Magnésio - MgO	5,22	1,53	0,40	0,44
Anidrido sulfúrico - SO ₃	2,28	-	0,01	-
Óxido de sódio - Na ₂ O	0,18	0,21	0,11	0,22
Óxido de Potássio - K ₂ O	0,89	1,98	1,45	0,93

Tabela 06 – Caracterização física dos materiais cimentícios

Característica	CP V - ARI	CV	CCA	SA
Massa específica (g/cm ³)	3,14	2,19	2,09	2,22
Área Específica B.E.T. (m ² /g)	5,96	3,55	18,71	19,50
Consistência normal (%)	29,10	-	-	-
Início de pega (min)	154	-	-	-
Fim de pega (min)	191	-	-	-
Idades (dias)	Resistência à compressão axial (MPa)			
3	38,1	-	-	-
7	38,6	-	-	-
28	50,0	-	-	-
Diâmetro médio das partículas (µm)	8,50	23,84	4,89	0,20

3.2.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa será areia natural de rio, proveniente do município de Santa Maria e região, material granular cujos grãos passam na peneira de 4,75 mm e que ficam retidos na peneira de 0,075mm.

3.2.3 Água

Para a moldagem dos corpos de prova será utilizado-se água potável. A água de amassamento deve ser limpa e sem impurezas que possam afetar a resistência, o tempo de pega ou gerar eflorescências e corrosão da armadura.

3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.3.1 Resistência à Compressão Axial

Os ensaios de resistência à compressão obedeceram a ABNT NBR 5738 (2015) ABNT 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 cilíndricas, metálicas, com dimensões de 5cm x10cm, área de seção transversal de 0,00196m² e volume de 0,000196m³. As demais informações necessárias encontram-se nas Tabelas 01 e 02.

3.3.2 Espessura de Carbonatação

Primeiramente produziram-se os corpos de prova na forma retangular obedecendo ao traço descrito na Tabela 01. Utilizou-se fôrmas com dimensões de 4,0cm x 4,0cm x 16,0cm, lubrificadas com óleo diesel queimado. Injetou-se concreto na fôrma de maneira lenta, e logo após iniciou-se o adensamento do concreto através de vibração pelo método mecânico, utilizando mesa vibratória. O concreto foi vibrado até que a superfície do mesmo começasse a brilhar, parando de subir bolhas de ar, o que ocorreu com aproximadamente 30 segundos de vibração.

Após 24 horas de cura em condições ambiente (naturais), foram desformados os corpos de prova, tendo suas duas faces paralelas (pontas) isoladas com uma pintura de parafina derretida, logo após, sendo expostos a um ambiente externo sem proteção da chuva e intempéries, posteriormente efetuando-se as leituras da Espessura de Carbonatação de acordo com as idades descritas na Tabela 03. O rompimento transversal realizou-se com talhadeira, logo após, aspergiu-se solução de fenolftaleína a 1 por cento, medindo-se a espessura carbonatada com paquímetro nos quatro cantos centrados obtendo-se a média das quatro leituras. Depois de feita cada leitura, pintou-se novamente a superfície rompida, assim, isolando-a com parafina derretida afim de que a carbonatação do concreto ocorresse somente pelas laterais (faces perimetrais), tendo em vista, que as leituras em todas as idades devem ser realizadas no mesmo corpo de prova para cada mistura distinta.

3.3.3 Difração de Raios X

O Difrátômetro de Raios X foi utilizado para analisar qualitativamente a geração de Calcita (CaCO₃) e Portlandita [Ca(OH)₂] nas respectivas idades, afim de analisar o consumo de hidróxido de cálcio em amostras expostas ao ambiente natural. A difração de raios X realizou-se no equipamento denominado Rigaku Mini Flex 600, com Difrátômetro de 40kV, 15mA e 600W de tensão, intensidade e potência máxima, respectivamente.

Os demais dados necessários, como por exemplo, idades de leitura encontram-se na Tabela 04, leituras as quais foram feitas nos corpos de prova apresentados na Tabela 03 (corpos de prova utilizados no ensaio de Espessura de Carbonatação).

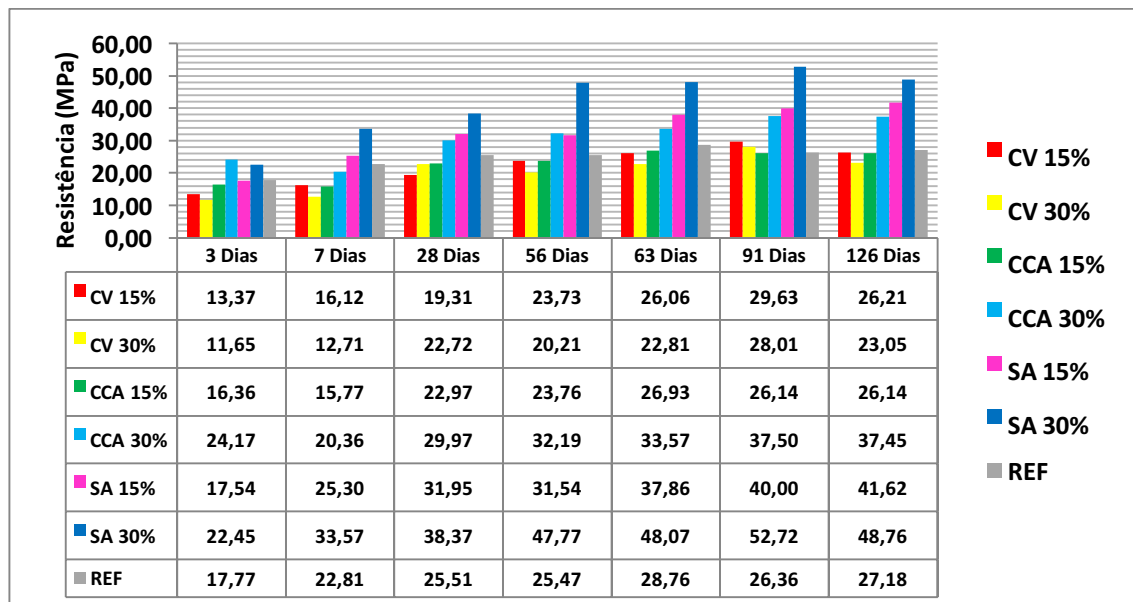
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando a necessidade de se adotar uma sequência lógica e coerente, desde a proposta dos objetivos e das questões da pesquisa até as respectivas conclusões, bem como, a conexão entre eles, neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no programa experimental, analisando-os e discutindo-os. Para tratamento estatístico dos resultados será feita a análise da variância, verificando assim, através do método “Anova: fator único” a existência ou não de diferenças estatisticamente significativas das variáveis de resposta.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados para o ensaio de Resistência à Compressão Axial para as diferentes substituições e idades são apresentados na Figura 01 a seguir, a qual apresenta o gráfico dos resultados para substituição de 15% e 30% de cimento por cinza volante, cinza de casca de arroz, sílica ativa e referência em todas as idades.

Figura 01 – Gráfico da resistência à compressão axial dos diversos traços em todas as idades ensaiadas.



Analisou-se primeiramente a relação entre os diferentes percentuais de substituição do cimento por pozolanas alternativas, 15% e 30%, através do método citado anteriormente. A Tabela 07 demonstra a análise da variância para as substituições de cinza de casca de arroz.

Tabela 07 – Análise da variância entre substituição de 15% e 30% de cinza de casca de arroz

	SQ	MQ	F	F crítico	Significância
CCA 15% x CCA 30%	673,20	673,20	19,985	4,085	SIM

Observa-se que como $F > F_{crítico}$, existem diferenças significativas entre os resultados de resistência a compressão axial nas substituições de 15% e 30% de cinza de casca de arroz, considerando que, a média de resistência com 15% de substituição foi de 22,74MPa e com 30% foi de 35,18% maior, ou seja, 30,74MPa.

A Tabela 08 apresenta a análise da variância para as substituições de cinza volante.

Tabela 08 – Análise da variância entre substituição de 15% e 30% de cinza volante

	SQ	MQ	F	F crítico	Significância
CV 15% x CV 30%	0,002	0,002	3,74E-05	4,085	NÃO

Já para as substituições de 15% e 30% de cimento por cinza volante, $F < F_{\text{crítico}}$, logo, não existem diferenças significativas entre os resultados de resistência a compressão axial para a cinza volante, verificando que a média de resistência para 15% de substituição foi de 22,21 MPa e para 30% foi de 22,22 MPa, praticamente iguais.

A Tabela 09 exibe a análise da variância para as substituições de sílica ativa.

Tabela 09 – Análise da variância entre substituição de 15% e 30% de sílica ativa

	SQ	MQ	F	F crítico	Significância
SA 15% x SA 30%	930,41	930,41	9,756	4,085	SIM

Para as substituições de 15% e 30% de sílica ativa percebe-se que $F > F_{\text{crítico}}$, assim, existindo diferenças significativas nos resultados de resistência à compressão axial. Nota-se que a média de resistência para 15% de substituição foi de 32,26MPa e para 30% de substituição foi de 29,17% maior, ou seja, 41,67MPa. Com isso, sugere-se a utilização das substituições com 30% de cimento por sílica ativa, prezando pelo meio ambiente e sustentabilidade, além, de uma melhor resistência que com 15% de substituição.

Logo, concretos com 15% e 30% de substituição por sílica ativa, bem como, com 30% por cinza de casca de arroz obtiveram desempenho acima do referênci, já para a cinza volante, a substituição de 15% teve melhor desenvolvimento, porém, ainda assim, as duas substituições, de 15% e 30% resultaram em resistências menores que o referênci, da mesma maneira que a substituição de 15% por cinza de casca de arroz. Desta forma, tendo em vista a sustentabilidade, consequentemente, o meio ambiente, o ideal seria a utilização de substituições de 30% do cimento em relação às pozolanas, levando em conta além de uma melhor eficiência, a diminuição da utilização do cimento.

Logo após, analisou-se de uma maneira global as resistências por material em relação ao referênci, independente da porcentagem de substituição do cimento por cinza de casca de arroz, cinza volante e sílica ativa. Na Tabela 10 observa-se a análise da variância da cinza de casca de arroz em relação ao referênci.

Tabela 10 – Análise da variância da cinza de casca de arroz em relação ao referênci

	SQ	MQ	F	F crítico	Significância
REF x CCA	50,705	50,705	1,358	3,998	NÃO

Nas substituições do cimento por cinza de casca de arroz, obteve-se $F < F_{\text{crítico}}$, logo, não existem diferenças significativas entre os resultados de resistência a compressão axial, pois, a média de resistência do referênci foi de 24,84MPa e para a cinza de casca de arroz foi de 26,74MPa, apenas 7,65% maior que o referênci, assim, sendo viável a utilização de cinza de casca de arroz para substituição do cimento.

Na Tabela 11 observa-se a análise da variância da cinza volante em relação ao referênci.

Tabela 11 – Análise da variância da cinza volante em relação ao referência

	SQ	MQ	F	F crítico	Significância
REF x CV	96,294	96,294	2,451	3,998	NÃO

Levando em conta as substituições do cimento por cinza volante, obteve-se $F < F_{crítico}$, logo, não existem diferenças significativas entre os resultados de resistência a compressão axial, pois, a média de resistência do referência foi de 24,84MPa e para a cinza de casca de arroz foi de 22,22MPa, 10,55% menor, dessa forma, não sendo recomendado a utilização de cinza volante para substituição do cimento, visto que, se o concreto for utilizado em obras, não seria ideal que possua resistência inferior ao F_{ck} desejado, neste caso, necessitando se recalculer ou até mesmo usar outro traço para uma possível utilização sem maiores problemas atingindo a resistência desejada.

Na Tabela 12 observa-se a análise da variância da sílica ativa em relação ao referência.

Tabela 12 – Análise da variância da sílica ativa em relação ao referência

	SQ	MQ	F	F crítico	Significância
REF x SA	2059,27	2059,27	25,113	3,998	SIM

Na análise da sílica ativa em relação ao referência atingiu-se $F > F_{crítico}$, assim, existindo diferenças significativas nos resultados de resistência à compressão axial, visto que, a média de resistência do referência foi de 24,84MPa e para a sílica ativa foi de 36,97MPa, ou seja, 48,83% mais alta, sendo favorável sua utilização para formulação de traços de concreto para a construção civil.

Após fez-se uma verificação global dos dados obtidos nas análises acima, chegando à conclusão de que em termos gerais de resultados, a melhor substituição, tendo em vista à Resistência à Compressão Axial é a sílica ativa, confirmando isto, realizou-se a análise da variância de forma generalizada, independente de idade ou percentual de substituição da sílica ativa em relação a cinza de casca de arroz e cinza volante, conforme dados apresentados nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13 – Análise da variância da sílica ativa em relação cinza de casca de arroz

	SQ	MQ	F	F crítico	Significância
SA x CCA	2195,56	2195,56	26,610	3,957	SIM

Tabela 14 – Análise da variância da sílica ativa em relação cinza volante

	SQ	MQ	F	F crítico	Significância
SA x CV	4569,25	4569,25	54,419	3,957	SIM

Tendo em vista o exposto nas tabelas 13 e 14, constata-se que para sílica ativa em relação a cinza de casca de arroz, bem como, em relação a cinza volante, $F > F_{crítico}$, dessa maneira, existindo diferenças significativas nos resultados de resistência à compressão axial. A sílica ativa teve média de resistência de 36,97MPa, enquanto a cinza de casca de arroz teve média de 26,74MPa e a cinza volante média de 22,22MPa. A sílica ativa teve uma média de resistência 38,26% maior que a cinza de casca de arroz e 66,38% maior que a cinza volante, confirmando assim que é mais eficiente.

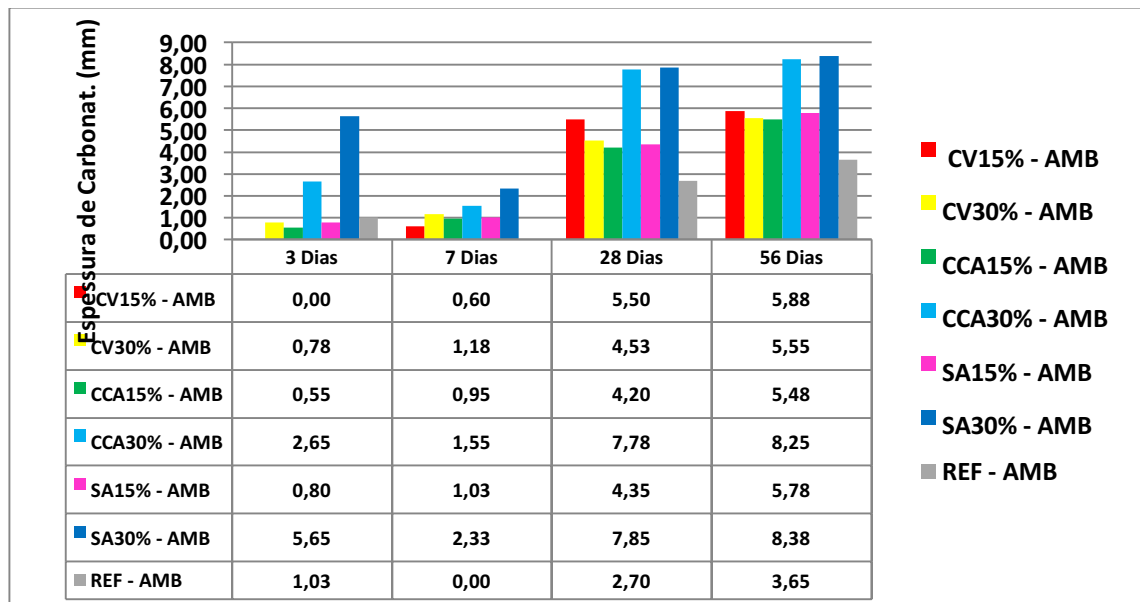
Dado o exposto, estudos realizados por Cordeiro (2001) revelaram a influência da finura dos grãos do aditivo na resistência à compressão, o que explica o melhor desempenho das substituições do cimento por sílica ativa, tendo em vista que seu diâmetro médio é de $0,20\mu\text{m}$, enquanto da cinza de casca de arroz é de aproximadamente $8,0\mu\text{m}$ e da cinza volante entre $7,0\mu\text{m}$ e $12,0\mu\text{m}$.

Logo, de acordo com Dal Molin (2011), em função de suas propriedades químicas e físicas, a sílica ativa é considerada uma excelente pozolana que, quando usada no concreto, além de atuar quimicamente também atua de forma física, através do efeito microfíler.

4.2 ESPESSURA DE CARBONATAÇÃO

De acordo com o ensaio de Espessura de Carbonatação (EC) descrito no item 3.3.2, a Figura 02 demonstra através de gráfico a espessura média de carbonatação por idade para as diferentes substituições e traços.

Figura 02 – Gráfico da espessura média de carbonatação dos traços em todas as idades.



Primeiramente fez-se a análise da variância para as relações de carbonatação entre as idades de 3 e 28 dias, e logo após, entre 3 e 56 dias, para os concretos expostos ao ambiente natural, conforme observa-se nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 – Análise da variância da EC dos concretos expostos ao ambiente natural- 3 e 28 dias

	SQ	MQ	F	F crítico	Significância
3 Dias x 28 Dias	46,264	46,264	12,351	4,747	SIM

Tabela 16 – Análise da variância da EC dos concretos expostos ao ambiente natural- 3 e 56 dias

	SQ	MQ	F	F crítico	Significância
3 Dias x 56 Dias	70,920	70,920	21,575	4,747	SIM

Percebe-se que, tanto para análise dos 3 para 28 dias, como de 3 para 56 dias, $F > F_{crítico}$, dessa maneira, existindo diferenças significativas nos resultados de carbonatação dos concretos expostos ao ambiente natural. A média da espessura de carbonatação aos 3 dias foi de 1,64mm, aos 28 dias foi de 5,27mm e aos 56 dias foi de 6,14mm, ou seja, com 28 dias houve aumento da carbonatação em relação aos 3 dias de 321,34% , com 56 dias havendo um aumento de 374,39%, dessa maneira, dos 28 para os 56 dias existindo um aumento de 53,05%.

Logo após, analisou-se de modo geral a média da espessura de carbonatação em relação ao referência, tendo em vista as diferentes substituições utilizadas, independente de idade ou percentual substituído do cimento. As Tabelas 17, 18 e 19 exibem as análises da variância para o referência quando comparado com a cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa, respectivamente.

Tabela 17 – Análise da variância da cinza volante em relação ao referência

	SQ	MQ	F	F crítico	Significância
REF x CV	17,306	17,306	3,955	4,600	NÃO

Tabela 18 – Análise da variância da cinza de casca de arroz em relação ao referência

	SQ	MQ	F	F crítico	Significância
REF x CCA	36,090	36,090	6,442	4,600	SIM

Tabela 19 – Análise da variância da sílica ativa em relação ao referência

	SQ	MQ	F	F crítico	Significância
REF x SA	51,804	51,804	9,727	4,600	SIM

Verifica-se que, tanto para cinza de casca de arroz, como para sílica ativa, $F > F_{crítico}$, dessa maneira existindo diferenças significativas entre os resultados de carbonatação para estas substituições. As substituições de cinza de casca de arroz apresentaram média de espessura de carbonatação de 3,93mm, enquanto a sílica ativa apresentou média de espessura de carbonatação de 4,52mm, 112,43% e 144,32%, respectivamente, a mais de carbonatação que o referência, o qual apresentou como média de espessura de carbonatação 1,85mm. Já para a cinza volante, $F < F_{crítico}$, dessa maneira não existindo diferenças significativas, pois, a média de espessura de carbonatação foi de 3,00mm, ou seja, 62,16% maior que o referência.

Também foi realizado Anova relacionando os diferentes percentuais de substituição, independente de idade e material utilizado. A Tabela 20 expõe a Anova para as substituições de 15% e 30% em relação ao referência.

Tabela 20 – Análise da variância das substituições de 15% e 30% de material em relação ao referência

	SQ	MQ	F	F crítico	Significância
REF x 15%	32,063	32,063	8,556	4,301	SIM
REF x 30%	100,450	100,450	19,759	4,301	SIM

Constata-se que como, $F > F_{crítico}$, tanto para substituições de 15% como de 30%, existem diferenças significativas nas substituições do cimento por pozolanas, visto que, a média de espessura de carbonatação do referência foi de 1,85mm e das substituições de 15% foi de

2,93mm, ou seja, houve aumento na carbonatação de 58,38%. Já para as substituições de 30% a média de espessura de carbonatação foi de 4,71mm, ou seja, aumento de 154,59% em relação ao referênciã.

A Tabela 21 explana os dados da análise da variância para as substituições de 15% em relação às de 30%, independente de idade e tipo de pozolana.

Tabela 21 – Análise da variância das substituições de 15% em relação às de 30%

	SQ	MQ	F	F crítico	Significância
15% x 30%	19,010	19,010	2,614	4,301	NÃO

Com os dados apresentados na Tabela 21, percebe-se que como, $F < F_{crítico}$, não existem diferenças significativas nas substituições de 15% em relação às de 30%, visto que, a média de espessura de carbonatação de 15% foi de 2,93mm e das substituições de 30% foi de 4,71mm. Logo, houve um aumento na carbonatação das substituições de 30% em relação as de 15% de 60,75%.

Indica-se que quando utilizada a substituição do cimento por estas pozolanas, seja feito um estudo aprofundado a respeito da vida útil da estrutura a ser construída, mesmo que os testes Anova, estatisticamente indiquem que não existem diferenças significativas nas profundidades de carbonatação dos corpos de prova ensaiados, tendo em vista que, valores variando a mais de 60% de diferença, do ponto de vista da engenharia sejam bem significativos, podendo diminuir muito a vida útil de uma estrutura.

Em âmbito geral, as substituições de 15% do cimento foram mais eficientes que as substituições de 30% em relação à carbonatação, em especial que a cinza de casca de arroz e a sílica ativa, em percentuais de 30%, que atingiram resultados mais expressivos, tendo em vista que foram os materiais e percentuais de substituição com maior média de carbonatação entre todos.

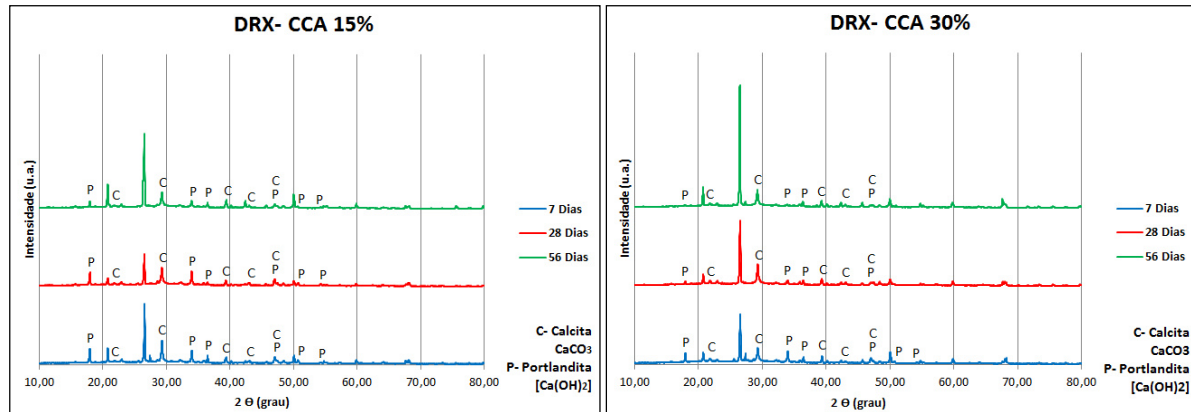
4.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Neste item são apresentados os resultados obtidos através da Difração de Raios X, sendo detectadas duas principais fases presentes cristalinas nos resíduos extraídos dos corpos de prova submetidos ao ensaio de Espessura de Carbonatação: Calcita ($CaCO_3$) e Portlandita ($Ca(OH)_2$).

A Portlandita (hidróxido de cálcio) é o principal responsável pela alta alcalinidade e é liberada em farta quantidade quando da hidratação do cimento Portland, detectada devido ao fato do resíduo se tratar de material parcialmente hidratado. Já a Calcita (carbonato de cálcio) se forma durante o processo de cristalização do carbonato de cálcio, onde o gás carbônico e outros gases ácidos presentes no interior do concreto reagem com os produtos liberados das reações de hidratação do cimento, precipitando-se como carbonato de cálcio ou Calcita.

A Figura 03 demonstra os gráficos da Difração de Raios-X da cinza de casca de arroz, com percentuais de substituição de 15% e 30%.

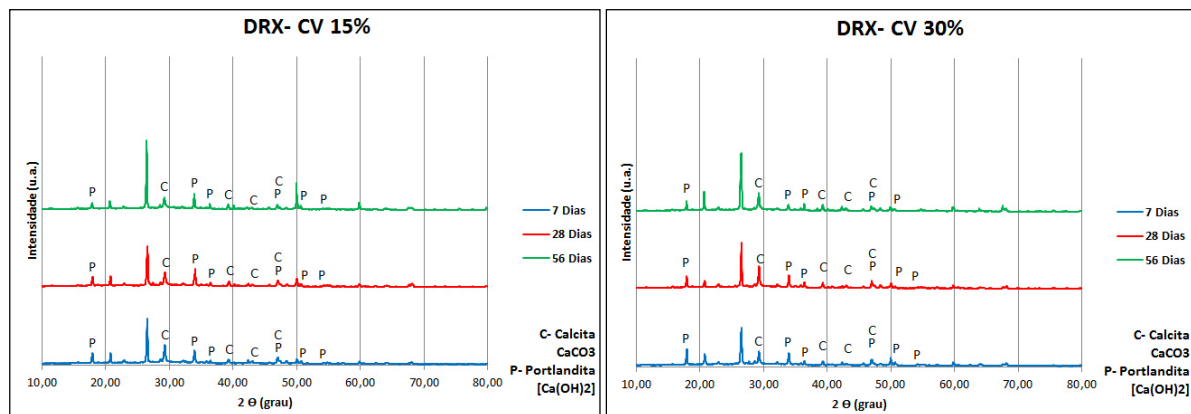
Figura 03 – Difração de raios X para substituição de 15% e 30% de cinza de casca de arroz



Conforme observamos na Difração de Raios X da cinza de casca de arroz, tanto para 15% quanto para 30% de substituição, percebemos que o hidróxido de cálcio foi reduzindo gradativamente até os 56 dias, sendo sua redução mais acentuada com 30% de substituição. Quando analisado o carbonato de cálcio, nota-se que com o passar da idade aumentou sua concentração, fenômeno este que podemos relacionar com os efeitos da carbonatação, tendo em vista que como explicado anteriormente, a formação de carbonato de cálcio ocorre devido à interação de gás carbônico com o hidróxido de cálcio, que é consumido durante o processo e uma vez que tenha sido esgotado o carbonato de cálcio começa a dissolver reduzindo assim o pH do concreto e depois de algum tempo trazendo certa fragilidade para o mesmo.

A Figura 04 demonstra os gráficos da Difração de Raios X da cinza volante, com percentuais de substituição de 15% e 30%.

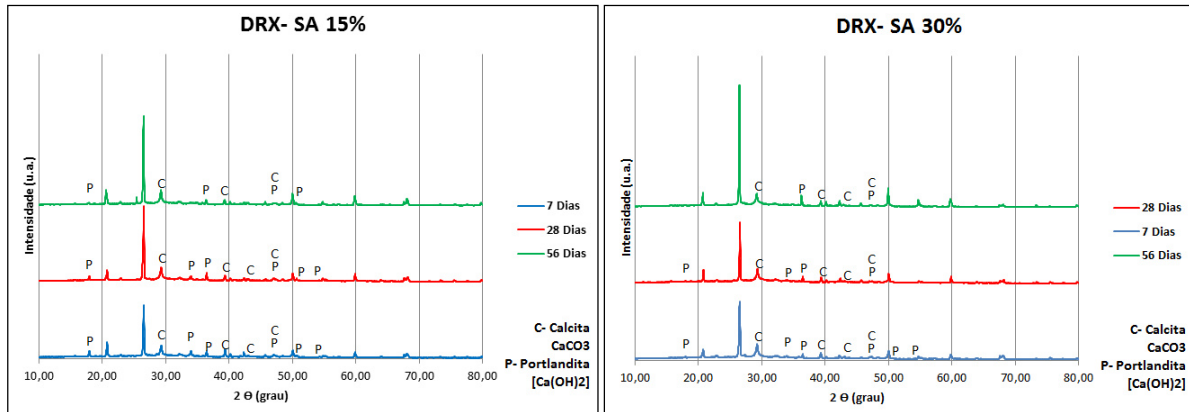
Figura 04 – Difração de raios X para substituição de 15% e 30% de cinza volante



Na Difração de Raios X da cinza volante, observamos nas duas substituições que com o aumento da idade houve uma pequena redução de hidróxido de cálcio, porém, confirmando-se que a cinza volante possui uma menor reatividade quando em relação às demais pozolanas estudadas neste trabalho. Também notou-se uma leve redução do carbonato de cálcio aos 28 dias, e posteriormente aos 56 dias, contrario ao ocorrido com a cinza de casca de arroz, que aos 28 e 56 dias aumentou a precipitação do carbonato de cálcio. Essa redução na formação de carbonato de cálcio nos mostra que mesmo sem o hidróxido de cálcio ter sido esgotado, a Calcita começou a ser dissolvida também, reduzindo o pH do concreto, assim o cimento chegando a uma fase que não consegue mais manter o pH e a fase CSH restante acaba sendo convertida para sílica gel amorfa, a qual é rica em sílica, porém, os grãos de cimento seco também são descalcificados neste estágio e como resultados o material restante fica altamente poroso e frágil.

A Figura 05 exibe os gráficos da Difração de Raios X sílica ativa, com percentuais de substituição de 15% e 30%.

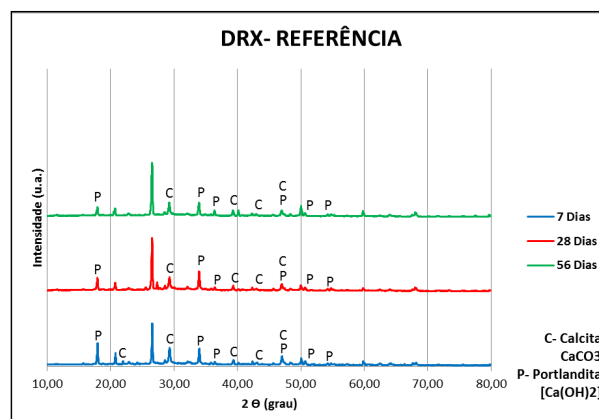
Figura 05 – Difração de raios X para substituição de 15% e 30% de sílica ativa



Com 15% de sílica ativa houve uma notória redução do hidróxido de cálcio, sendo mais acentuada com 30% de substituição e em 56 dias sendo praticamente consumido. Como a sílica ativa possui um módulo de finura menor que cinza de casca de arroz e cinza volante, e também possui maior reatividade pozolânica, Neville (2016) explica que o desenvolvimento das reações pozolânicas induz a uma diminuição nos teores de CH na solução dos poros do concreto, fazendo com que se necessite de menor quantidade de CO_2 para reagir com o CH e formar os carbonatos. Este processo, conseqüentemente, aumenta a velocidade de carbonatação, pois a difusão do CO_2 nos poros é mais rápida devido à menor quantidade de CH disponível para reagir. Também observou-se uma significativa formação de carbonato de cálcio, o qual acaba por preencher regiões porosas com calcita sólida criando assim um material mais denso e mais resistente (BARLET-GOUÉDARD, 2007).

A Figura 06 exibe o gráfico da Difração de Raios X do referênciã.

Figura 06 – Difração de raios X para o concreto referênciã



Percebeu-se que para o referênciã com o avançar da idade houve uma redução considerável de hidróxido de cálcio e uma leve diminuição na precipitação de carbonato de cálcio, ainda assim, resultados ligeiramente superiores às substituições, fenômeno este que podemos relacionar com a utilização do cimento CP V – ARI para produção dos corpos de prova, visto que, esse tipo de cimento não possui pozolanas em sua constituição, não o tornando

indicado para concretos com agregados reativos, que é o caso da cinza de casca de arroz, cinza volante e sílica ativa.

A partir dos difratogramas expostos, evidenciou-se a diminuição dos picos de carbonato de cálcio, bem como, dos picos de hidróxido de cálcio. Conforme, Tasca (2012), a atenuação dos picos de carbonato de cálcio, na camada superficial do concreto, é proveniente da reação de carbonatação ocasionada na mesma; de maneira similar ocorre à diminuição da intensidade dos picos de hidróxido de cálcio, devido o avanço da carbonatação.

Percebeu-se que, em âmbito geral, os concretos expostos ao ensaio de Difração de Raios X obtiveram resultados ligeiramente inferiores ao concreto de referência, não chegando a influenciar na eficiência da substituição.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise dos resultados obtidos no programa experimental, comprovou-se no que tange a resistência à compressão axial do concreto, que todos os materiais estudados nesse trabalho, independentemente de percentual de substituição, 15% ou 30%, proporcionaram resistências com viabilidade técnica de utilização em estruturas de concreto, verificando-se que, mesmo atingindo médias de resistências inferiores ao referência, às substituições de 15% e 30% de cinza volante, bem como, de 15% de cinza de casca de arroz, não apresentaram diferenças significativas a ponto de influenciar na estabilidade estrutural de qualquer obra que se utilize de concreto com as referidas substituições.

No que diz respeito ao ensaio de Difração de Raios X, conseqüentemente ao ensaio de Espessura de Carbonatação, notou-se que todos os concretos com substituição, independentemente do percentual da mesma, atingiram resultados inferiores ao referência, dessa maneira, demonstrando a necessidade que se façam mais estudos aprofundados no tocante a esse quesito, para que futuramente quando utilizada essa técnica não venham a ocorrer possíveis patologias nas estruturas ou até mesmo o colapso.

De modo geral, a pesquisa teve grande importância, verificando assim a viabilidade técnica da utilização de substituições do cimento por cinza de casca de arroz, cinza volante e sílica ativa, bem como, o benefício ambiental e sustentável que essas pozolanas trazem para a população como um todo, diminuindo as emissões de CO₂ na atmosfera devido à redução de produção do cimento. Este estudo foi realizado com corpos de prova expostos em condições reais de uma estrutura de concreto, aproximando assim os ensaios da realidade.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial**. São Paulo; ABNT, 1991.

_____. **NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 5739 – Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. Série Sustentabilidade, volume 5. São Paulo: Blücher, 2011.

BARLET-GOUÉDARD, V.; Rimmelé, G.; Goffé, B.; Porcherie, O. **Well technologies for CO2 geological storage: CO2 – resistant cement**. Oil and Gas Science and Technology, Vol 62 (2007), pp. 325-334.

CEMBUREAU. THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION. **The role of cement in the 2050 low carbon economy**. 2013. Pg.27-64

CORDEIRO, G. C. **Concreto de Alto Desempenho com Metacaulinita**. Dissertação (Mestrado). Campos dos Goytacazes, 2001. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Centro de Ciência e Tecnologia.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições Minerais, Concreto Ciência e Tecnologia**. Vol. 1, Cap. 8. São Paulo. 2011.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014: Mitigation of Climate Change**. IPCC, 2014. Disponível em <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf>. Acesso em: 08 de ago. 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.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, ONU. **Perspectivas da população mundial: revisão de 2015**. 2016.

SNIC. SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual 2014**. 2015.

TASCA, M. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura**. 2012. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.