

Concreto com cimento geopolimérico com substituição de metacaulim por cinza de casca de arroz

Concrete with geopolymer cement with substitution of metacaulim for rice husk ash

DOI:10.34117/bjdv6n12-025

Recebimento dos originais: 03/11/2020

Aceitação para publicação: 03/12/2020

André Tavares Rocha

Engenheiro de Materiais pelo Instituto Federal do Pará

Endereço: Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, CEP: 66093-020, Belém, Pará, Brasil

E-mail: andre.tavr@hotmail.com

Marco Antonio Barbosa de Oliveira

Mestre em Engenharia Civil

Instituição: Instituto Federal do Pará

Endereço: Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, CEP: 66093-020, Belém, Pará, Brasil

E-mail: marco.barbosa@ifpa.edu.br

Rodrigo Rodrigues da Cunha

Mestre em Engenharia Civil

Instituição: Instituto Federal do Pará

Endereço: Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, CEP: 66093-020, Belém, Pará, Brasil

E-mail: rodrigo.totalmix@gmail.com

Syme Regina Souza Queiroz

Doutora em Engenharia Civil

Instituição: Instituto Federal do Pará

Endereço: Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, CEP: 66093-020, Belém, Pará, Brasil

E-mail: syme.souza@ifpa.edu.br

Alcebíades Negrão Macêdo

Doutor em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Federal do Pará

Endereço: Rua Augusto Corrêa, 01, Guamá, CEP: 66075-970, Belém, Pará, Brasil

E-mail: anmacedo@ufpa.br

RESUMO

A produção de cimento Portland representa cerca de 8% da emissão mundial de CO₂ no processo industrial. Deste modo, concreto com cimento geopolimérico surge como alternativa tecnológica, pois cimento geopolimérico apresenta reduzido consumo energético e emissão de gases efeito estufa a partir do uso de resíduos industriais e cinzas de biomassa, com proposta de elevada resistência mecânica inicial, ao ataque químico e a elevada temperatura. Esse estudo buscou avaliar características físicas, mecânicas e microestruturais de concreto geopolimérico com agregados da Região Metropolitana de Belém do Pará à base de metacaulim isolado ou combinado com cinza de casca de arroz. Os resultados

apontaram que concreto geopolimérico com metacaulim ou deste combinado com 10% de cinza de casca de arroz apresentaram melhores comportamentos físico-mecânico-microestrutural.

Palavras-chave: Resistência à Compressão, Absorção de Água, Índice de Vazios, Densidade Aparente, Microscopia Eletrônica de Varredura.

ABSTRACT

The Portland cement production represents about 8% of the world CO₂ emissions in the manufacturing process. Therefore, concrete with geopolymer cement presents it self as a technological alternative, because the geopolymer cement has a reduced energy consumption and greenhouse gas emission that is provenient from the use of industrial waste and biomass ashes, such as a high initial mechanical, chemical attack and high temperature resistances. This study aimed to evaluate the physical, mechanical and microstructural characteristics of the geopolymer concrete with aggregates from the Metropolitan Region of Belém do Pará, based on metakaolin alone or combined with rice husk ash. The results indicated that geopolymer concrete with metakaolin or combined with 10% rice husk ash showed better physical-mechanical-microstructural behaviors.

Key words: Compressive Strength, Water Absorption, Void Index, Apparent Density, Scanning Electron Microscopy.

1 INTRODUÇÃO

Os geopolímeros são obtidos a partir de materiais ricos em sílica e alumina ativados por solução alcalina, que apresentam características de rápido endurecimento, boa resistência mecânica, ao fogo e substâncias ácidas e baixa condutividade térmica [1, 2]. O cimento geopolimérico é um sistema de ligação obtido pela adição de uma solução alcalina ou ácida (silicato de sódio ou potássio, fosfórico ácido) a fontes de aluminossilicato (caulim, metacaulim, cinzas volantes, escória, etc.) [3, 4, 5].

Vários estudos têm destacado a potencialidade dos geopolímeros para a utilização em obras de pontes, pavimentação, tratamento de resíduos, hidráulica, engenharia subterrânea, etc. [6]. Aplicações como dormentes de ferrovias, blocos refratários, painéis pré-fabricados, reparação de rodovias e em obras de infraestrutura de pavimentação [7]. Em outros a partir de desenvolvimento de estudo de pastas poliméricas, a partir de propriedades de concentração molar do ativador alcalino, dosagem sólido/líquido na mistura, tempo e temperatura de cura para fabricação de argamassas de concreto, espuma geopolimérica, tijolo e blocos sólidos [8].

A reação de geopolimerização pode não ocorrer na totalidade ou haver formação de carbonato de sódio em contato com ar, respectivamente, para baixas ou altas concentrações molares do ativador alcalino [9]. Deste modo, é extremamente interessante ampliar estudos para conhecimento das propriedades dos materiais geopoliméricos, a fim de otimizar a viabilidade técnico-econômica e ampliar sua utilização [10]. Surge esse desafio da produção e utilização do material geopolimérico “in loco” a ser superados nos próximos anos pelos pesquisadores para consolidação deste material [11].

A cinza da casca de arroz (CCA) é um resíduo industrial de grande interesse para a indústria do cimento Portland (CP), no que se refere à sua pozolanicidade. Boas propriedades físicas e mecânicas são obtidas nas pastas com até 30% de substituição do CP por CCA, em massa. Entretanto, da mesma forma que com outras pozolanas artificiais, o elevado percentual de carbono e a necessidade de cominuição tornam-se um inconveniente, fazendo com que este material encontre certa resistência ao seu uso. No caso dos geopolímeros, fontes de sílica amorfa possui grande utilidade, já que podem ser empregadas como precursor para a cadeia principal Si-O-Si. No entanto, a cinza de casca de arroz possui teores altos de sílica (SiO₂) e a produção de geopolímeros requer a presença de alumina (Al₂O₃) para composição de razões molares necessárias, sendo assim houve a blenda da cinza de casca de arroz com metacaulim, que adicionados ao ativador alcalino obtém-se pasta geopolimérica. Ademais ao acrescentar agregados tem-se argamassa ou concreto geopolimérico com características e comportamento distintos, que precisam ser avaliados em atenção aos diferentes tipos de agregados. Deste modo este estudo tem objetivo de avaliar concreto geopolimérico à base de cinza de casca de arroz e metacaulim ativados com hidróxido de sódio e agregados miúdos e graúdos (seixo) da Região Metropolitana de Belém do Pará.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

No programa experimental houve a caracterização física do cimento, agregado miúdo e graúdo, conforme apresentada na Tabela 1. O precursor metacaulim com massa específica de 2,55 g/cm³ e a fluorescência de raios-X (FRX) apresentada na Tabela 2. Enquanto a cinza de casca de arroz com os resultados de FRX apresentado na Tabela 3. Utilizou-se água apenas no concreto de referência (CR) e nos concretos geopoliméricos com precursor metacaulim isolado (CGM) ou combinado com cinza de casca de arroz nos teores de 10%, 15% e 20%, respectivamente, CG(M+CA10), CG(M+CA15) e CG(M+CA20) não houve a utilização de água, mas foi utilizado um ativador alcalino de hidróxido de sódio (NaOH) do tipo micro pérola P.A com teor de 97% de grau de pureza. A solução alcalina ativadora foi preparada com ativador alcalino (NaOH) e água destilada com concentração molar de 10 molar. Manteve-se uma relação de solução alcalina ativadora/precursor metacaulim de 1,05.

À medida que se aumentou a quantidade de cinza de casca de arroz na mistura foi possível reduzir a quantidade de metacaulim, pois ocorreu maiores condições de trabalhabilidade e mobilidade da mistura proporcionada pela a morfologia de partículas esféricas da cinza de casca de arroz, e ainda a redução da demanda de solução ativadora em função da redução metacaulim na mistura e consequentemente de Al₂O₃ para reagir.

A partir de ajustes de dosagem ocorreu processo de mistura no misturador mecânico, conforme [12]. E houve a produção de três amostras para cada família correspondente ao concreto de referência

(CR) com cimento Portland, concreto geopolimérico com precursor de metacaulim (CGM) isolado ou combinado com precursor de cinza de casca de arroz nos teores de 10%, 15% e 20%, respectivamente, CG(M+CA10), CG(M+CA15) e CG(M+CA20). Houve inicialmente a mistura combinada dos precursores metacaulim e cinza de casca de arroz com posterior adição da solução alcalina e agregado miúdo e graúdo.

Foi utilizado molde de 50 mm x 100 mm para moldagem de corpo de prova de concreto geopolimérico e de referência. Decorridos 24 horas da moldagem houve a desmoldagem e então submetidos à cura térmica à 60°C em estufa por 28 dias. Houve ajustes na dosagem e mistura do concreto geopolimérico a partir das particularidades dos materiais da localidade. Após 28 dias de idade houve a realização de ensaios para avaliação de propriedades físicas de absorção de água, índice de vazios e densidade aparente, conforme [13, 14]. A avaliação do comportamento mecânico ocorreu com a resistência à compressão axial de corpo de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm [15] para idades de 1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias em prensa universal da marca EMIC. Amostras de concreto de referência e geopolimérico foram submetidas à análise de microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS) em equipamento de modelo VEJA 3 LMU da marca TESCAN. O consumo de materiais está apresentado na Tabela 4.

Houve a realização de análise de variância (ANOVA) para verificar se há ou não influência das variáveis e se suas categorias na resistência à compressão, por exemplo, a fim de saber se existe ou não diferença entre os valores de resistência à compressão, quando comparados as idades de cada concreto geopolimérico (CGM), CG(M+CA10), CG(M+CA15) e CG(M+CA20) para categorias de variáveis individualmente. Houve a utilização do Teste de Tukey para verificar efeito das categorias de variáveis e obter conclusões mais específicas sobre diferenças entre médias a partir de nível de confiança de 95% e erro aceitável de significância $\alpha = 5\%$ para todos os testes realizados.

Tabela 1 - Caracterização do cimento Portland, agregados miúdo e graúdo.

Materiais	Tipo	DMC (mm)	MF	MU (g/cm³)	ME (g/cm³)	Método de Ensaio
Cimento	CP II F-40			-	3,02	[16]
Agregado miúdo	Areia fina	1,20	1,71	1,29	2,62	[17]
Agregado graúdo	Seixo de rio	9,5	4,90	1,41	2,63	[18]
Método de Ensaio		[19]	[19]	[20]		

Nota: DMC – Diâmetro Máximo Característico; MF – Módulo de Finura; MU – Massa Unitária; ME – Massa Específica.

Tabela 2 - Composição química do metacaulim.

Óxidos	Teores	Limite [21]
SiO ₂	55,5%	44,0% a 65,0%
Al ₂ O ₃	36,5%	32,0% a 46,0%
Fe ₂ O ₃	2,0%	-
TiO ₂	1,0%	-
CaO	0,5%	CaO + MgO < 1,5%
MgO	0,5%	
K ₂ O	1,5%	0,658K ₂ O + Na ₂ O < 1,5%
Na ₂ O	0,1%	< 0,5%
SO ₃	0,1%	< 1,0%

Tabela 3 - Composição físico-química da cinza de casca de arroz.

Parâmetros	Resultados	Especificação Padrão
Umidade (%)	1,00	3,0% (máx.)
Teor de SiO ₂ (%)	93,40	88,0% (min.)
Granulometria diâmetro (%) médio (microns)	16,96	< 20 microns (625 mesh)
Densidade (kg/m ³)	922	>800 kg/m ³ (min.)
Atividade pozolânica em mg Ca(OH) ₂ /g amostra	978,26	765 mg Ca(OH) ₂ /g (min.)

Tabela 4 - Consumo de materiais (kg/m³).

Família	CM	MCL	CCA	AR	SX	Água	NaOH	S/L	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
CR	458	-	-	718	922	202	-	0,44 (a/c)	-
CGM	-	407	-	642	824	-	427	1,05 (s/l)	1,52
CG(M+CA10)	-	400	40	630	808	-	420	0,95 (s/l)	-
CG(M+CA15)	-	397	59	624	802	-	417	0,92 (s/l)	-
CG(M+CA20)	-	393	79	618	794	-	413	0,88 (s/l)	-

Nota: CCA – CM – Cimento; MCL – Metacaulim; Cinza de Casca de Arroz; Ar – Areia; SX – Seixo; S/L – Solução/Ligante.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O metacaulim apresentou os teores de óxidos na FRX dentro dos limites [21] e na análise de DRX identificou as fases de caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄) e quartzo (SiO₂). Na análise de DRX da cinza de casca de arroz apresentou a fase de cristobalita. A Figura 1 mostra que houve a tendência de aumento de absorção de água à medida que aumenta o índice de vazios. A Figura 2 mostra em contrapartida à medida que houve redução da densidade aparente ocorreu uma tendência de aumento da absorção de água. Verificou-se que essa tendência de aumento ou redução das outras propriedades com absorção de água, ocorreu à medida que houve maiores de percentuais de combinação da cinza de casca de arroz com metacaulim, tanto para a correlação da absorção de água com índice de vazios quanto com a densidade aparente.

Com a finalidade representar desvio-padrão houve a utilização de barra de erros para verificar incerteza a partir da extensão no gráfico, em que barra de erros com maior extensão indica valor médio mais incerto pela concentração de valores baixa no cálculo da média, de modo diferente valor médio menos incerto para barra de erros com menor extensão, quando há concentração de valores é alta em torno do cálculo da média. Desta maneira, segundo a Figura 1, observou-se maiores valores de barras de erros para concreto geopolimérico de metacaulim combinado com 10% e 20% de cinza de casca de arroz (CGCA15) e menores valores para os demais.

O desvio-padrão é raiz quadrada da variância, e quando desvio-padrão aumenta com a média tende-se a variância em função da média, indicando uma distribuição assimétrica e não haver igualdade de variâncias, com raciocínio semelhante no caso inverso, que pode ser observado a partir da correlação entre desvio-padrão e média. A correlação linear de Pearson, a partir do coeficiente de correlação linear de Pearson (R), permite medir grau de relação entre variáveis em termos quantitativos, que fica na faixa de $-1 \leq R \leq +1$, cujo $R = +1$, indica que uma reta com inclinação positiva passa por pontos alinhados no gráfico, enquanto $R = 0$, aponta que não há grau de relação linear entre as variáveis e $R = -1$, que apresenta relação negativa. Deste modo verifica-se que a absorção de água e o índice de vazios são propriedades que estão inter-relacionadas com relação linear e coeficiente de correlação linear ($R=0,94$), que dentro da escala de correlação entre variáveis enquadra-se como forte positiva [22].

A densidade aparente apresentou valores de barras de erros mais acentuados que a absorção de água. Constatou-se que a absorção de água e a densidade aparente apresentaram um coeficiente de correlação linear ($R=0,3$), que dentro da escala de correlação entre variáveis enquadra-se como baixa negativa [22], conforme mostra a Figura 2.

Figura 1 - Absorção versus Índice de Vazios.

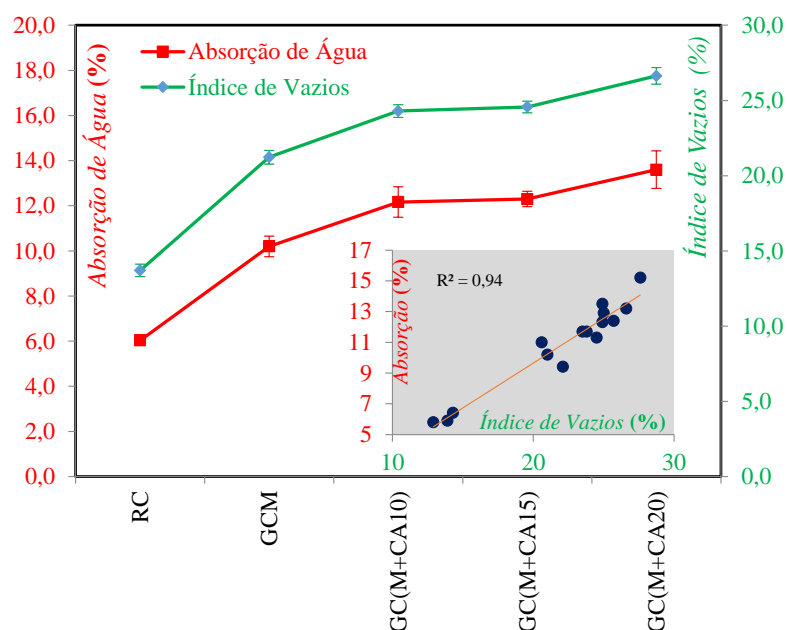
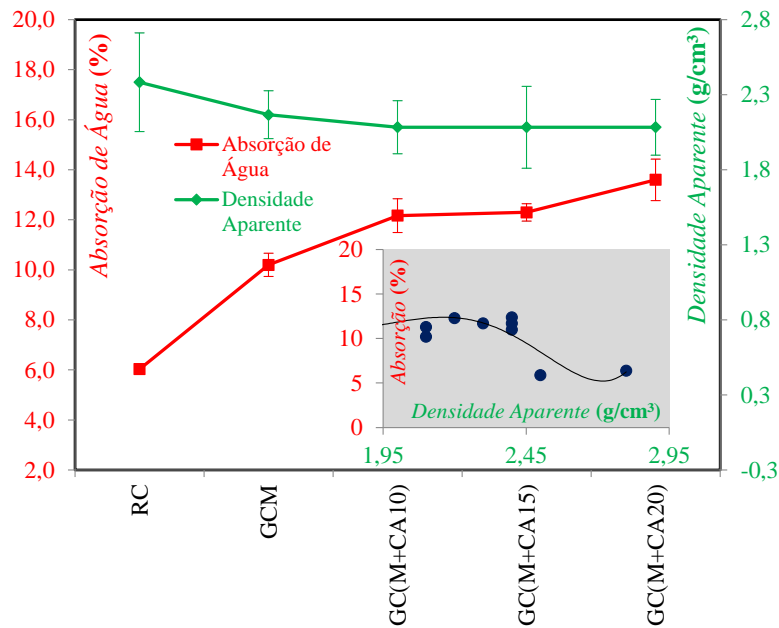


Figura 2 - Absorção versus Densidade Aparente.



A Figura 3 mostra que a resistência à compressão do concreto geopolimérico com metacaulim (CGM) e relação Si/Al de 1,52 apresentou um comportamento semelhante de crescimento da resistência ao longo dos dias em relação ao concreto de referência. Os concretos geopoliméricos CG(M+CA10), CG(M+CA15) e CG(M+CA20) obtiveram-se menores níveis de resistência em relação ao CGM com a redução mais pronunciada à medida que houve um aumento do percentual de cinza de casca de arroz combinado com metacaulim, em decorrência da ineficiente dissolução e policondensação da sílica amorfa presente na cinza de casca de arroz com a solução alcalina e uma fração de sílica amorfa residual não reagida, que influenciou na redução da reatividade, densificação e resistência. E por ter utilizado menores consumos de solução alcalina pode ter influenciado na formação de menores níveis de cristais [21].

[23] constatou que houve um aumento de resistência à compressão não confinada (UCS) à medida que ocorreu acréscimo na relação Si/Al numa faixa de 1,2 e 1,7, denominados de SA12 e SA17, respectivamente. Relações de Si/Al de 1,8 (SA18) e 2,0 (SA20) apresentam menores resistências à compressão, entretanto maiores para maiores idades. [23.24] verificaram que geopolímeros com menores relações de Si/Al (1,4, 1,6 e 2,0), respectivamente, SA14, SA16 e SA17) geram gel rico em Al com desenvolvimento de ligações rápidas de Si-O-Al, que ocasionam resistência à compressão mais rápidas. Enquanto que para maiores relações de Si/Al, tem-se resistência à compressão iniciais menores em função da formação de ligações Si-O-Al lentamente e maiores resistências à compressão ao longo prazo, devido à formação de ligações Si-O-Si de modo mais lenta, que estão relacionadas à degradação de geopolímeros à base de metacaulim, por exemplo, fissuras de secagem formadas durante a cura.

[25, 26, 27] observaram que a relação Si/Al depende da idade da amostra e ligações de Si-O-Al. [27] notou que para menores relações de Si/Al ocorre maiores taxas de liberação de precursores nos geopolímeros, que promovem uma polimerização de maneira acelerada e precipitada com formação de maiores ligações Si-O-Al do que ligações Si-O-Si [54], acarretando maiores taxas de reação para menores idades. Maiores concentrações de Na⁺ e OH⁻ podem acelerar a polimerização, devido à dissolução de tetraedros de sílica e alumina [26]. De modo que no metacaulim ocorrem dissolução de tetraedros de alumina mais rápidas em relação ao tetraedro de sílica [28].

Notou-se que a relação Si/Al de 1,7 (SA17) influencia no aumento da taxa de gel geopolimérico independentemente da idade. Enquanto para relações de Si/Al de 1,8 (SA18) e 2,0 (SA20) ocorre um aumento progressivo do gel geopolimérico de 89,0% após a idade de 28 dias. No entanto resistência à compressão e módulo de elasticidade para SA18 aumentam consideravelmente até idade de 7 dias e reduzem depois dessa idade, devido a falhas estruturais a partir de fissuras de retração por secagem. Para relações Si/Al acima de 2,0 (SA20), por exemplo, SA22 há formação muito baixa da taxa de gel geopolimérico, que ocasiona implicação negativa na geopolimerização [29].

A Figura 4 mostra uma tendência de redução da resistência à compressão aos 28 dias com aumento da absorção de água com um coeficiente de correlação linear ($R=0,78$), que dentro da escala de correlação entre variáveis enquadra-se como forte negativa [22]. A Figura 5(a, b, c, d) mostra a resistência à compressão dos concretos geopoliméricos (CGM, CGCA10, CGCA15 e CGCA20), em que a partir da análise de variância (ANOVA) para analisar se há ou não de diferença estatisticamente significativa entre as médias de resistência à compressão, quando comparadas, individualmente, as idades de cada categoria das variáveis: (i) CGM; CGCA10 (ii); CGCA15 (iii); CGCA20 (iv), verificou-se que não existe diferença estatisticamente significativa ($p=0,453$), entre os valores de resistência à compressão, quando comparadas as idades de 7, 14 e 21 dias para a categoria CGM e ; nas idades 7, 14, 21 e 28 dias para CGCA10 e CGCA20; e nas idades 14, 21 e 28 dias para CGCA15.

Figura 3 - Resistência à compressão em diferentes idades.

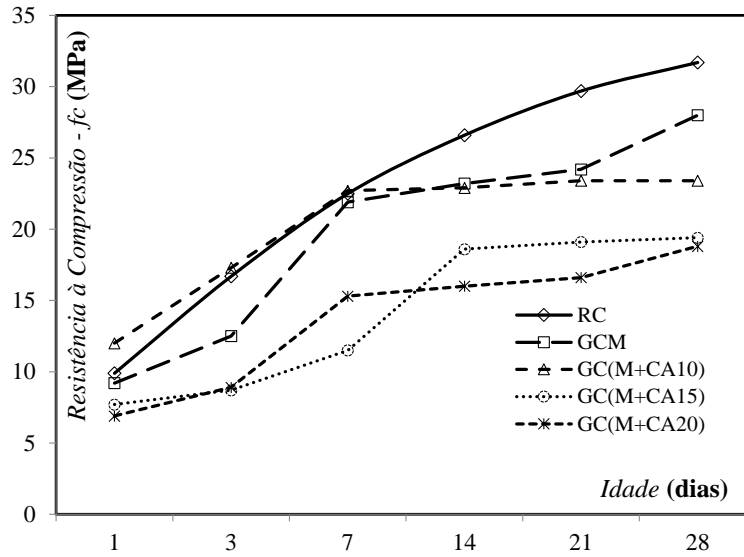


Figure 4 - Resistência à compressão versus Absorção.

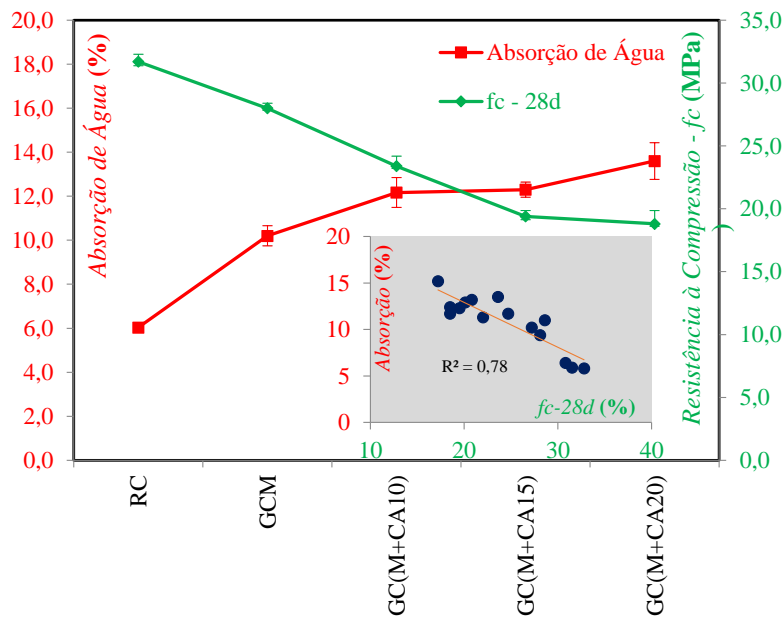
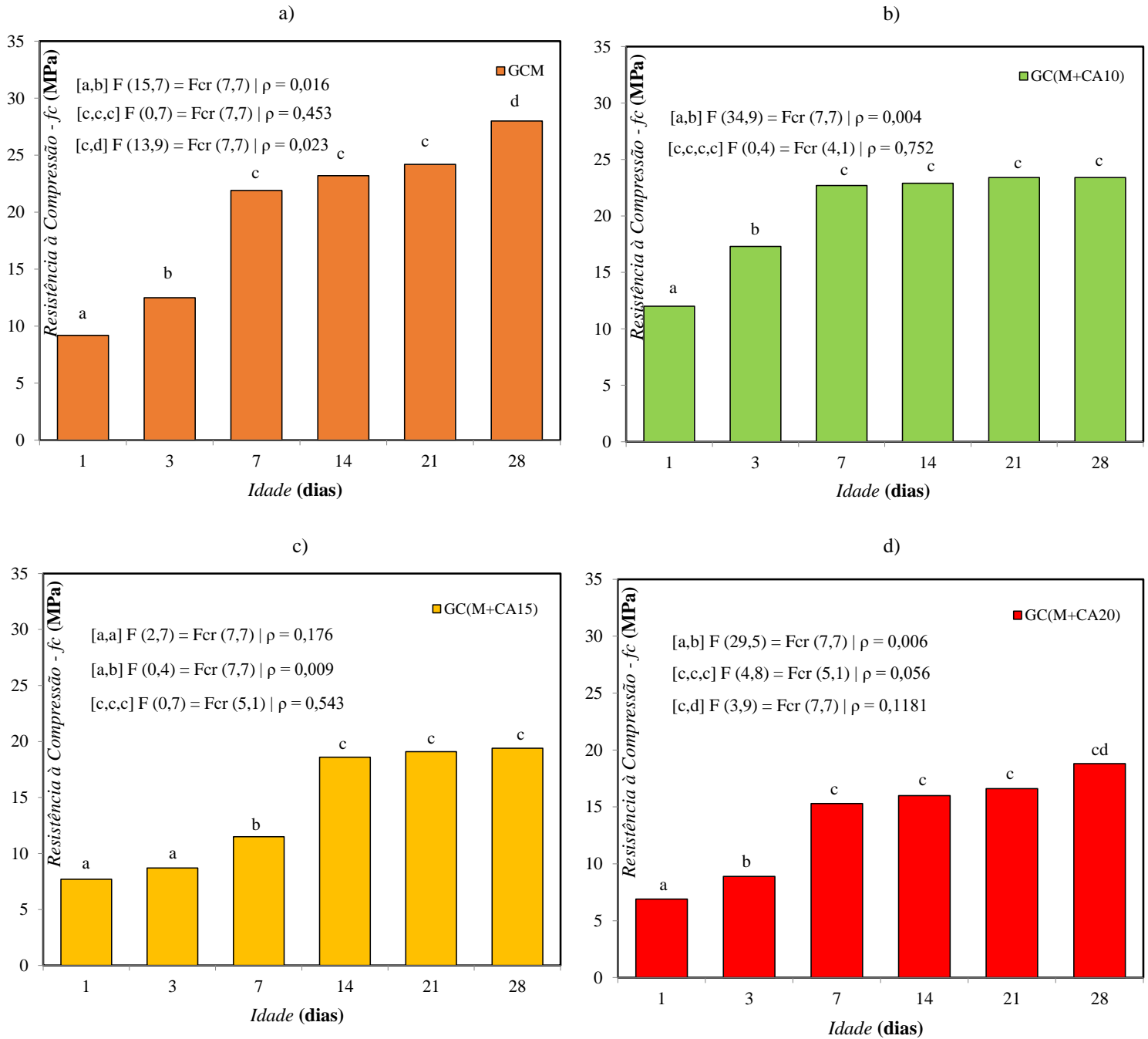


Figure 5 - Resistência à compressão e ANOVA: a) GCM, b) CGCA10, c) CGCA15, d) CGCA20



A precisão ou inversamente a dispersão dos dados em relação à grandeza da média, pois à medida que há redução da precisão dos dados ocorre aumento da dispersão e variância. Com a finalidade de medir utilizou-se a ferramenta estatística de coeficiente de variação (CV). A precisão relativa auxilia na análise do experimento, quando realizados em laboratório recomenda-se não apresentar ($CV > 10\%$) e em campo ($CV < 30\%$), no entanto deve ser comparado com autores na literatura [22]. A Tabela 5 apresenta os valores de coeficiente de variação, cujo se constata que a densidade aparente de todos concretos estudados, e a resistência à compressão com aa idade de 1 dia

para CR, CGM, CG(M+CA10), CG(M+CA15), na idade de 3 dias para CR e a absorção de água para CG(M+CA20) apresentaram CV > 10%.

Tabela 5 - Coeficiente de variação das propriedades físico-mecânicas para nomenclaturas analisadas.

		Coeficiente de variação (%)					
Propriedades físico-mecânicas		CR	CGM	GC(M+CA10)	GC(M+CA15)	GC(M+CA20)	
Absorção (%)		5,3	7,8	9,6	4,9	10,6	
Índice de Vazios(%)		5,3	3,7	3,0	2,7	3,6	
Densidade Aparente (g/cm³)		24,4	13,0	15,0	23,2	15,8	
Resistência à Compressão	Idade (dias)	1	13,7	8,8	12,1	12,1	3,0
		3	11,3	9,5	3,5	7,3	6,7
		7	6,3	9,4	3,1	6,6	1,6
		14	3,6	8,5	4,6	4,3	3,8
		21	4,3	6,7	4,1	5,0	3,6
		28	3,2	2,5	5,8	4,2	9,7

A Figura 6 mostra imagens do concreto de referência obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que se observa cristal hexagonal de Portlandita (CaOH₂) e cristal acicular de etringita primária ou Trissulfoaluminato de cálcio hidratado (C₃AS₃H₃₂). É comum a presença desses cristais no cimento Portland hidratado. A Figura 7 mostra a análise de Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS) do concreto de referência com presença pronunciada de elementos de Ca e Si, presentes nas fases de componentes cristalinos de silicato de cálcio hidratado (CSH), Etringita e Portlandita, formados da hidratação do cimento Portland.

Figura 8 - Microscopia eletrônica de varredura (CR).

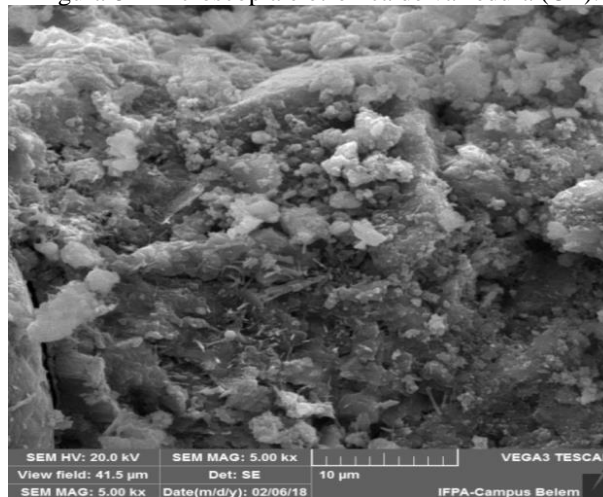
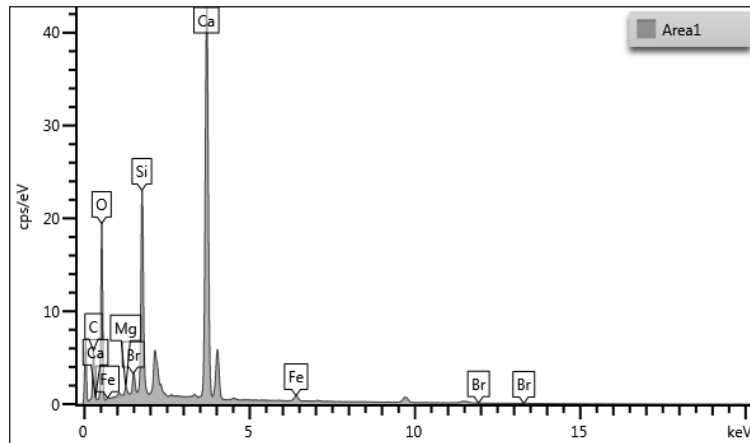


Figura 7 - Espectrometria de energia dispersiva (CR).



A Figura 8 mostra MEV realizada no CGM, em que nota-se uma matriz geopolimérica compacta e densidade homogêneas, em que houve despolimerização do metacaulim com incorporação e dispersão na matriz geopolimérica, que promoveu um reforço mais eficiente na estrutura de concreto geopolimérico, embora se constate a ocorrência de superfície com fratura irregular. Ademais a matriz de concreto geopolimérico é constituída de uma única fase contendo aluminossilicato de potássio, cálcio e sódio e a sua microestrutura é menos porosa e mais massiva que em relação ao concreto de referência, mostrado na Figura 8. O geopolímero com metacaulim com maiores resistência elevação da resistência mecânica e melhor acabamento das amostras [30]. A Figura 9 mostra EDS do CGM, que se constatou a presença de cristais gerados no processo de formação de geopolimerização com elementos químicos (Si, Al, Na), provenientes dos tetraedros de SiO_4 , octaedros de AlO_4 e solução alcalina, respectivamente.

Figura 8 - Microscopia eletrônica de varredura (CGM).

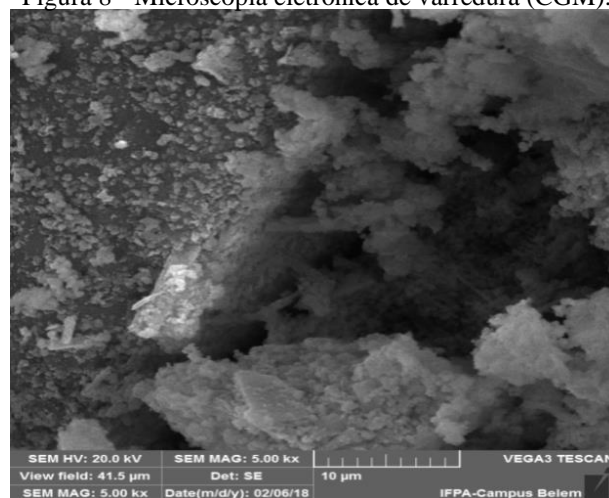
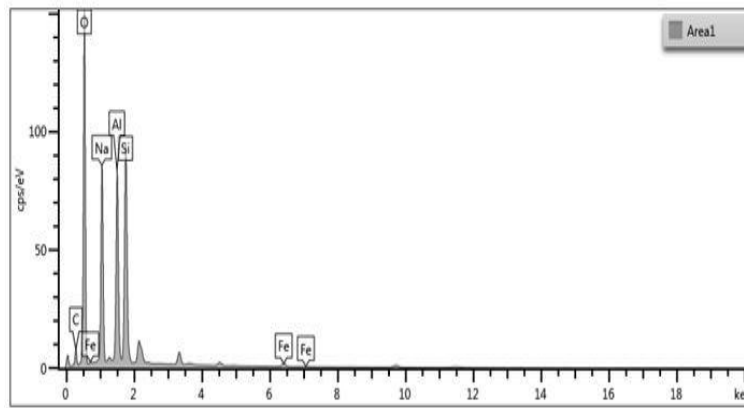


Figura 9 - Espectrometria de energia dispersiva (CGM).



As Figuras 10, 11 e 12 mostram MEV do concreto geopolimérico à base de metacaulim (CGM) com substituição por 10%, 15% e 20% de cinza de casca de arroz CG(M+CA10), CG(M+CA15) e CG(M+CA20), respectivamente, que se observa matriz heterogênea e formação de fissuras em CG(M+CA10) e CG(M+CA15). [31] Ao analisar microestrutura eletrônica de varredura da face fraturada de amostras de geopolímero com lodo de ETA calcinado constatou uma matriz densa e presença de poros e microfissuras aos 7 dias. Esses defeitos podem ocorrer em estágio inicial de cura do geopolímero, devido pouca trabalhabilidade e pega imediata. As microfissuras podem estar relacionadas à ausência de areia e finos no geopolímero [32].

Figura 10 - Microscopia eletrônica de varredura (M+CA10).

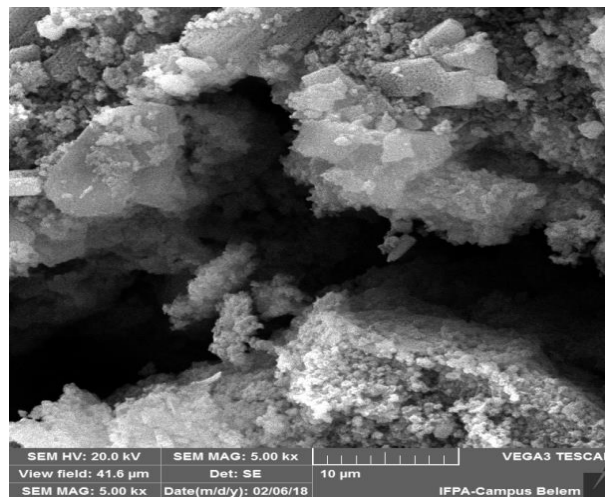


Figura 11 - Microscopia eletrônica de varredura (M+CA15)

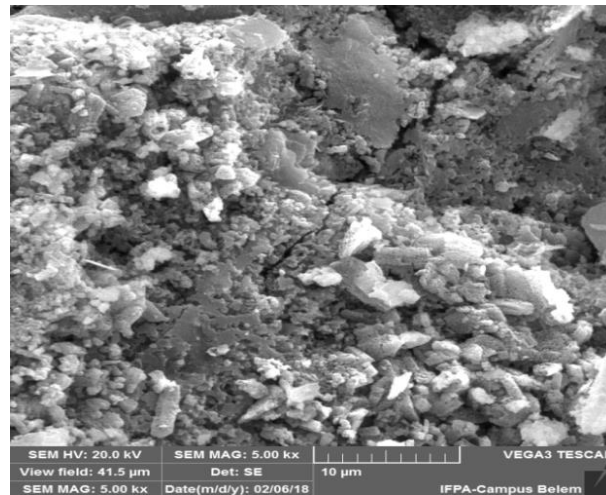
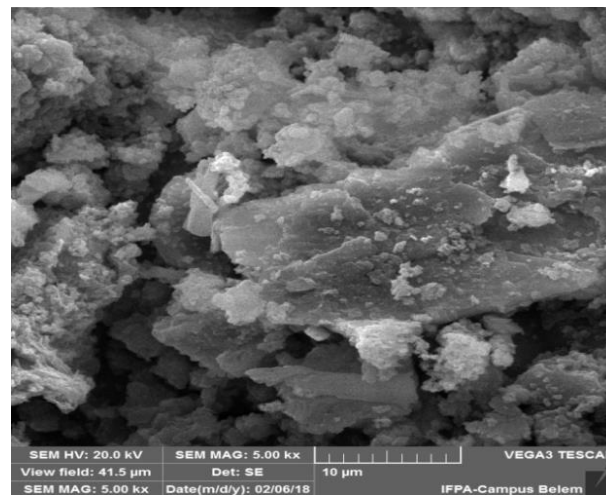


Figura 12 - Microscopia eletrônica de varredura (M+CA20)



A partir das Figuras 13, 14 e 15 mostram EDS, nota-se que houve um aumento do elemento químico (Si) à medida que há um acréscimo da adição da cinza de casca de arroz. E a redução do elemento (Al), indicando consumo do metacaulim e do elemento (Na) presente na solução alcalina. No concreto geopolimérico com metacaulim (CGM) e com cinza de casca de arroz CG(M+CA10) e CG(M+CA15) com 10% e 15% respectivamente, observa-se a formação da fase composta de aluminossilicato de sódio.

Figura 13 - EDS (M+CA10)

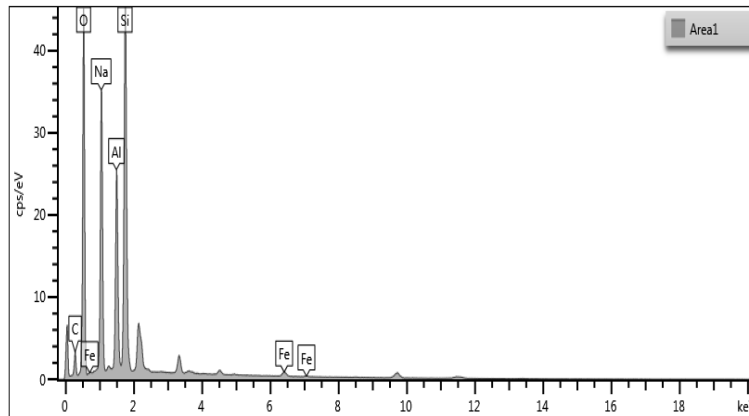


Figura 14 - EDS (M+CA15)

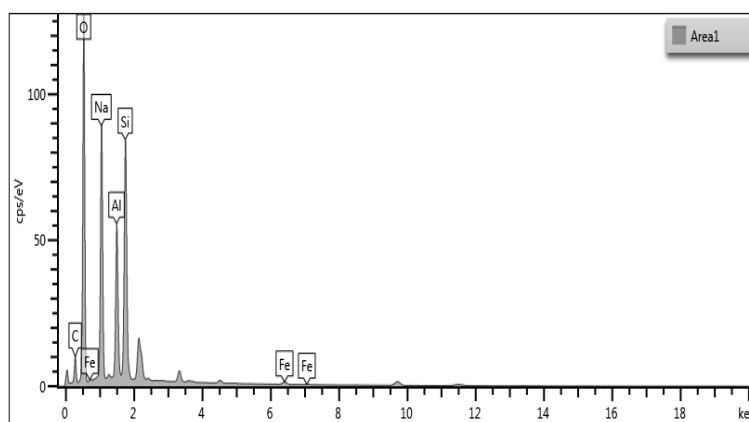
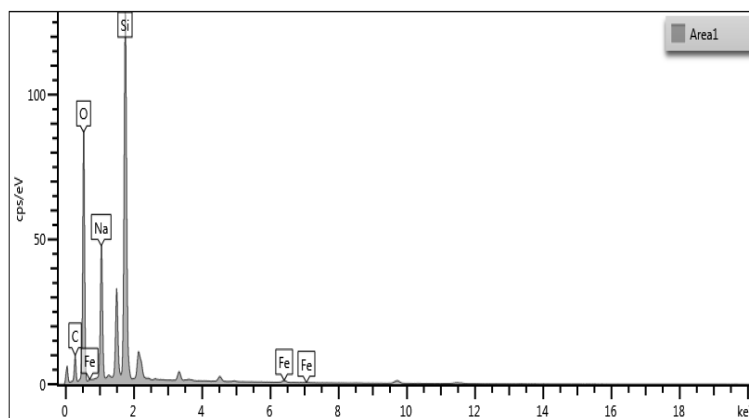


Figura 15 - EDS (M+CA15)



4 CONCLUSÃO

Houve uma tendência de aumento de índice de vazios com aumento da absorção de água, em contrapartida uma redução da densidade aparente. Essa tendência de aumento ou redução sofreu maiores níveis de influência à medida que houve maiores de percentuais de combinação da cinza de casca de arroz com metacaulim. A resistência à compressão do concreto geopolimérico com

metacaulim (CGM) apresentou comportamento similar ao concreto de referência com aumento da resistência ao longo da idade.

Os concretos geopoliméricos com cinza de casca de arroz obtiveram-se menores níveis de resistência em relação ao concreto de referência e somente com metacaulim. Essa redução foi mais acentuada à medida que houve aumento do percentual de cinza de casca de arroz. Houve uma tendência de redução da resistência à compressão aos 28 dias com aumento da absorção de água. Constatou-se por meio de ANOVA que não existe diferença estatisticamente significativa, entre os valores de resistência à compressão, quando comparadas as idades de 7, 14 e 21 dias para a categoria CGM e; nas idades 7, 14, 21 e 28 dias para CG(M+CA10) e CG(M+CA20); e nas idades 14, 21 e 28 dias para CG(M+CA15).

Na análise de MEV verificou-se cristal hexagonal de Portlandita e acicular de etringita primária. Enquanto no EDS a presença mais acentuada de elementos de Ca e Si, que estão presentes nas fases cristalinas CSH, etringita e Portlandita do concreto de referência. No MEV do CGM observou uma matriz geopolimérica compacta e densidade homogêneas composta de fase de aluminossilicato de potássio, cálcio e sódio. Deste modo, no EDS verificou-se a presença de (Si, Al, Na).

No MEV do CG(M+CA10), CG(M+CA15) e CG(M+CA20), notou-se uma matriz heterogênea e formação de fissuras em CG(M+CA10) e CG(M+CA15). No EDS, houve um aumento do elemento químico (Si), redução do elemento (Al) e do elemento (Na) presente na solução alcalina à medida que há um acréscimo da adição da cinza de casca de arroz.

REFERÊNCIA

- [1] L.K. Turner, F.G. Collins, *Constr. Build. Mater.* 43 (2013) 125.
- [2] Senff, L.; Hotza, D.; Ferreira, V.M.; Repette, W.L.; Labrincha, J.A. *Adv. Appl Ceram.* 109 (4) (2010) 213.
- [3] Davidovits, J. *Geopolymers: inorganic polymeric new materials*, *J. Therm. Anal.* 37 (1991) 1633.
- [4] Davidovits, J. In: *Proc. 3rd Inst. Geopolymer*, Saint-Quentin, France, 2011.
- [5] Tchakouté, H.K.; Rüscher, C.H.; Hinsch, M.; Djobo, J.N.Y.; Kamseuc, E.; Cristina, L. *Chemie der Erde-Geochem.* 77 (2017) 257.
- [6] Davidovits, J. *Geopolymer chemistry and properties*, in *Proc. 1st Eur. Conf. Soft Miner.*, Compiègne, France, 1988.
- [7] Glasby, T.; Day, J.; Genrich, R.; Aldred, J. *Geopolymer concrete aircraft pavements at Brisbane West Wellcamp Airport 2015 Conf.*, Melbourne, Australia (2015).
- [8] Singh, B.; Ishwarya, G.; Gupta, M.; Bhattacharyya, S.K. *Constr. Build. Mater.* 85 (2015) 78.
- [9] Zaharaki, D.; Komnitsas, K. In: *Proc. 3rd Int. Conf. Assessing*, Athens, Greece, 2009.
- [10] Margarido, F.; Gonçalves, M.C. *Ciência e Engenharia de Materiais de Construção*. Ed. Atual, São Paulo, SP (2012) 1057.
- [11] Nematollahi, B.; Sanjayan, J.; Shaikh, F.U.A. *Ceram. Intern.* 41 (4) (2015) 5696.
- [12] Ass. Bras. Normas Técn., “Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova”, NBR 5738, ABNT, Rio de Janeiro (2015).
- [13] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ASTM C 830, “Standard Test Methods for Apparent Porosity, Liquid Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Refractory Shapes by Vacuum Pressure” (2016).
- [14] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ASTM C20, “Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water” (2015).
- [15] ABNT. NBR 5739/2018 - Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- [16] ABNT. NBR NM 20/200 - Cimento Portland e materiais pó – Massa específica. Rio de Janeiro, 2000.
- [17] ABNT. NBR NM 52/2009 - Agregado Miúdo: Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- [18] ABNT. NBR NM 53/2009 - Agregado Graúdo: Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

- [19] ABNT. NBR NM 248/2003 - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [20] ABNT. NBR NM 45/2006 - Agregados em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 2006.
- [21] ABNT. NBR 15894 - Metacaulim para uso com cimento em concreto, argamassa e pasta – Requisitos. 2010.
- [22] Ramos, E.M.L.S. Notas de aulas. Belém, PA (2018) 148.
- [23] Zhang, M.; Zhao, M.; Zhang, G.; El-Korchi, T.; Tao, M. *Cement Concrete Comp.* 78 (2017) 21.
- [24] Hajimohammadi, J.L.; Provis, J.S.J.; Deventer, V. *Chem. Mater.* 22 (18) (2010) 5199.
- [25] Fernandez-Jimenez, A.; Palomo, A.; Sobrados, I.; Sanz b, J. *Microporous Mesoporous Mater.* 91 (2006) 111.
- [26] Cheng, T.W.; Chiu, J.P. *Miner. Eng.* 16 (2003) 205.
- [27] Silva, P. de; Sagoe-Crenstil, K.; Sirivivatnanon, V. *Cement Concrete Res.* 37 (2007) 512.
- [28] Gao, K.; Kae-Long Lin, Wang, De Y.; Chao-Lung Hwang, Hau-Shing Shiu, Yu-Min Chang, Ta-Wui Cheng, *Constr. Build. Mater.* 53 (2014) 503.
- [28] Provis, J.L.; Yong, S.L.; Duxson, P. In: *Geopolymers*, Woodhead Publishing (2009) 72.
- [29] Rowles, M.R.; O'Connor, B.H.; *J. Am. Ceram. Soc.* 92 (10) (2009) 2354.
- [30] Santos, E.A.; Melo, M.A.F.; Melo, D.M.A.; Freitas, J.C.O.; Martinelli, A.E.; Melo, V.R.M.; Medeiros, R.L.B.A. *Cerâmica* 61 (2015) 309.
- [31] Santos, G.Z.B.; Melo Filho, J.A.; Manzato, L. *Cerâmica* 64 (2018) 276.
- [32] Provis, J.L.; Duxson, P.; Van Deventer, J.S.J. *Adv. Pow. Technol.* 21 (2010) 2.