

PRODUÇÃO DE CONCRETO DE CIMENTO GEOPOLIMÉRICO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO METACAULIM POR ESCÓRIA DE ALTO FORNO*

Ana Beatriz Rodrigues Porto¹
Andrey Victor Lima Fanjas²
Marco Antonio Barbosa de Oliveira³
Sérgio Neves Monteiro⁴
Alisson Clay Rios da Silva⁵

Resumo

Os Geopolímeros são polímeros inorgânicos de uma nova classe de materiais que apresentam características particulares, sendo reações de geopolimerização de vários constituintes, como matérias-primas naturais de origem geológica contendo aluminossilicatos. Neste trabalho, por meio de dosagem adaptada dos componentes, foi desenvolvido o concreto de cimento geopolimérico (CCG), o qual foi comparado com o concreto de cimento Portland (CCP), através da fixação da relação água/aglomerante. Para a obtenção do metacaulim, houve a necessidade de calcinar o caulim em uma temperatura de 850°C por 2 horas e o resíduo utilizado foi Escória de Alto Forno como principal fonte de Cálcio. Foram realizados estudos preliminares de argamassas geopoliméricas com 7 dias de cura. O melhor percentual encontrado foi de 69% de areia em Argamassa. Este resultado então foi aplicado para o estudo do Concreto de Cimento Geopolimérico, posteriormente submetidos a ensaios de compressão na idade de 7 dias. Os resultados mostraram que o CCG atingiu resistência à compressão média de 42 Mpa, se enquadrando na normativa de Concreto de Alta resistência inicial e mostrando resultados similares ao do Concreto de Cimento Portland. As superfícies de fratura foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), a partir dos fragmentos retirados dos corpos-de-prova rompidos no ensaio mecânico. As análises apresentaram a melhor aderência matriz/agregado no CCG em comparação ao CCP.

Palavras-chave: Concreto; Geopolímero; Portland; Escória.

PRODUCTION OF CONCRETE OF GEOPOLYMERIC CEMENT WITH PARTIAL REPLACEMENT OF METACAULIM OF THE NORTH REGION BY BLAST FURNACE SLAG.

Abstract

Geopolymers are inorganic polymers of a new class of materials that have particular characteristics, being geopolymerization reactions of several constituents, as natural raw materials of geological origin containing aluminosilicates. In this work, by means of adapted dosage of the components, the geopolymer cement concrete (CCG) was developed, which was compared with the Portland cement concrete (CCP), by fixing the water / binder ratio. To obtain the metacaulim, it was necessary to calcine the kaolin at a temperature of 850°C for 2 hours and the residue used was blast furnace slag as the main source of calcium. Preliminary studies of geopolymeric mortars with 7 days of cure were carried out. The best percentage found was 69% sand in mortar. This result was then applied to the study of the Geopolymeric Concrete Cement, later submitted to compression tests at the age of 7 days. The results showed that the GCC reached an average compressive strength of 42 Mpa, in compliance with the initial high strength concrete standard and showing results similar to that of Portland cement concrete. The fracture surfaces were analyzed by scanning electron microscopy (SEM), from the fragments removed from the specimens ruptured in the mechanical assay. The analyzes presented the best adhesion matrix / aggregate in the CCG in comparison to the CCP.

Keywords: Concrete; Geopolymer; Portland; Slag.

¹ Engenheira de Materiais, Ananindeua, Pará, Brasil.

² Graduando em Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará (UFPA), Ananindeua-PA, Brasil.

- ³ *Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia Civil, Professor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Pará, IFPA/Belém, Brasil.*
- ⁴ *Engenheiro de Materiais, PhD em Engenharia e Ciência dos Materiais, Professor, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais/Departamento de Engenharia mecânica e Materiais, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.*
- ⁵ *Químico industrial, Doutor em Ciência dos Materiais, Professor Adjunto I, Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará (UFPA), Ananindeua-PA, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Um dos materiais mais conhecidos é o concreto de Cimento Portland. A maioria das obras antigamente empregavam materiais formados de rochas e ligantes que por sua vez são constituídos a partir de argilas, cinzas vulcânicas, calcário e resinas de animais e vegetais em construções [1].

Com o passar dos anos o concreto vem sendo melhorado, é um dos materiais mais usados devido a sua versatilidade de confecção, moldagem e baixo custo. A principal composição de um concreto é feita a partir de um material homogêneo composto por agregados (brita, areia, material pulverizado) e por aglomerante (cimento Portland), com função de uni-los, dando-lhe resistência mecânica com o passar do tempo [1].

Para o concreto geopolimérico [2], a pasta geopolimérica é utilizado como aglomerante ao invés do cimento Portland. Os geopolímeros, também chamados polissialatos, são polímeros inorgânicos de uma classe de materiais que apresentam características físicas e químicas singulares. Na produção de geopolímeros, aluminossilicatos são dissolvidos parcialmente com soluções alcalinas contendo NaOH ou KOH [2]. A razão Silício/Alumínio (Si/Al) é a principal variável no processo de geopolimerização. São obtidos por um processo semelhante àquele empregado na síntese de zeólitas cristalinas, processo consiste na polimerização hidrotérmica em ambiente altamente alcalino [3]. Para a designação química de geopolímeros baseados em sílico-aluminatos, o pesquisador Davidovits [4] chamou-os de poli (Sialato). A rede Sialato consiste em tetraedros SiO_4 e AlO_4 ligados alternadamente, compartilhando todos os oxigênios, de acordo com a Figura 1.

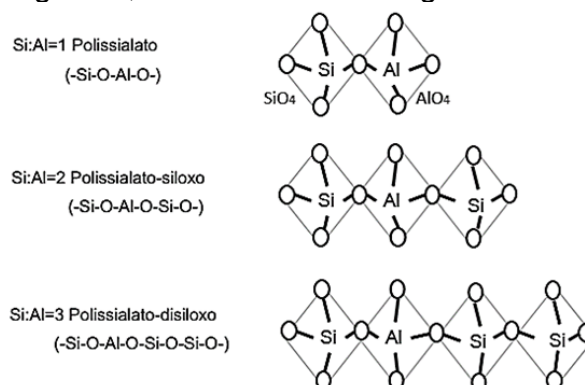


Figura 1. Representação esquemática dos polissialatos [5].

As diferentes formas de síntese dos geopolímeros são baseadas nas composições molares entre os compostos reagentes, que influenciam diretamente nas propriedades do produto obtido. As principais matérias-primas utilizadas são o metacaulim, como fonte de silício e alumínio e as escórias como fonte de cálcio, além de uma fonte de álcalis (KOH) ou (NaOH) [6].

A matéria-prima para a produção do metacaulim é o caulim, que é uma argila formada pela alteração de uma variedade de rochas amorfas e cristalinas, sendo que a caulinita é o principal argilomineral constituinte do caulim [7]. A caulinita sendo um filossilicato, é formada por uma combinação de folhas tetraédricas de sílica e folhas octaédricas de gibbsita (ion coordenado alumínio), situando-se nos planos dos octaedros, com O e OH dessa folha, quando passada por tratamento térmico (calcinação), está se encontra amorfa [8].

A solução alcalina é a parte considerada importante na preparação do geopolímero. Os ativadores alcalinos como hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de

potássio (KOH), silicato de sódio (Na_2SiO_3) e silicato de potássio (K_2SiO_3), são usados para ativar materiais de aluminossilicatos [9]. As Escórias de Alto Forno (EAF) é um resíduo que se formam pela fusão das impurezas do minério de ferro, juntamente com a adição de fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque. A escória fundida é uma massa que, por sua insolubilidade e menor densidade, sobrenada no ferro gusa e é conduzida por canais, até o lugar de resfriamento de acordo com a empresa Arcelor Mittal [10]. Em que é granulada durante o processo de resfriamento brusco e posteriormente moída. As propriedades físico-químicas da escória granulada de alto-forno a tornam um material de grande utilização tanto para o cimento Portland quanto para o geopolímero.

Neste trabalho, foram realizados ensaios de Resistência à compressão tanto para o *Concreto de Cimento Geopolimérico (CCG)* quanto para o Concreto de Cimento Portland (CCP). O procedimento para caracterização dos materiais, mistura e moldagem, bem como as rupturas dos corpos-de-prova, foram realizados de acordo com as prescrições normativas e procedimentos usuais utilizados para o Concreto à base de cimento Portland. A microscopia eletrônica de varredura foi realizada nas superfícies de fratura dos concretos. Este trabalho teve como objetivo principal promover o estudo de Concreto de Cimento Geopolimérico, usando as matérias-primas, o Metacaulim como principal fonte de aluminossilicato, com substituição de resíduos de Escória de Alto forno como fonte principal de Cálcio, bem como sua comparação com o Concreto de Cimento Portland.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a preparação do Concreto de Cimento Geopolimérico (CCG) foi utilizado metacaulim como fonte de alumínio e silício, obtido pela calcinação do caulim e como fonte de cálcio foi utilizado Escória de Alto Forno. A solução ativadora utilizada foi composta por Hidróxido de potássio e silicato de sódio (alcalino) e agregado miúdo areia passante na peneira de 4,8 mm e agregado graúdo brita 0. Para o Concreto de Cimento Portland foi utilizado cimento Portland CP V – ARI com os mesmos agregados. Para melhor comparação por ser um cimento de alta resistência inicial.

A Figura 2, apresenta as matérias-primas, a solução alcalina e os agregados utilizados para a produção do Concreto de Cimento Geopolimérico

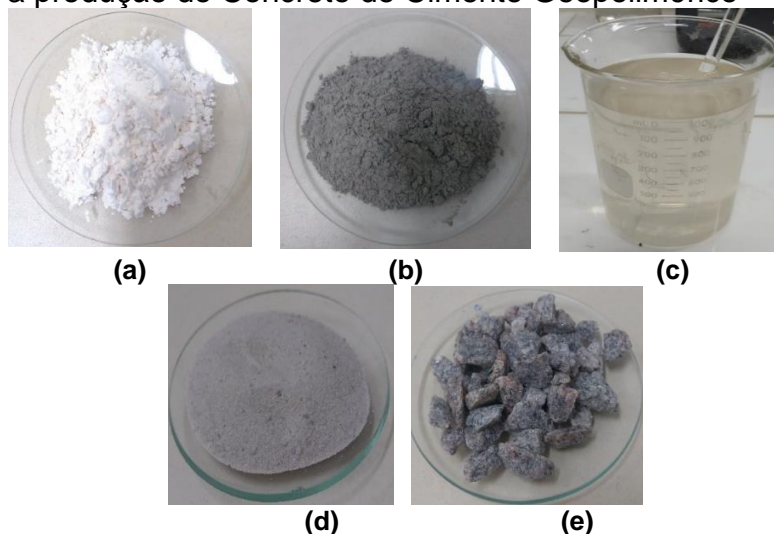


Figura 2. Materiais para o CCG: (a) MKL, (b) EAF(c) solução de KOH e SS, (d) areia, (e) brita 0.

2.1 Metodologia

A calcinação do caulim, para a produção do metacaulim, foi realizada em um forno mufla da marca ZEZIMARQ, com capacidade de aquecimento de até 1200 °C, a uma temperatura de 850°C por um período de 2h. O tempo e a temperatura empregados foram estabelecidos com base nos estudos preliminares de [11], antes da produção deste trabalho seguiu-se recomendações dos estudos de [12]. A secagem da escória de alto forno foi realizada em estufa, marca QUIMIS por 24 horas à 100 ± 5° C, esta foi moída em um moinho de bolas de marca MATOLI – 070M016, por 3 hrs. Os materiais mencionados acima foram utilizados os passantes na peneira de #200mesh.

2.2 Métodos de obtenção da argamassa geopolimérica

Para o estudo de argamassa geopolimérica foi utilizado os métodos de [13] para Portland e de [12] para determinações dos percentuais de areia para a argamassa. Estes estudos utilizaram percentuais ideais com 60% de areia em argamassa de Portland e argamassa geopolimérica, baseado nesses estudos houve a necessidade da procura do percentual ideal de areia para a argamassa geopolimérica com os seguintes percentuais 21%, 59%, 69% e 81%, Figura 4.

Para a determinação de resistência a compressão da argamassa geopolimérica utilizou-se a norma ABNT NBR 7215 (1996) como referência. Foram então moldados cinco (5) CP's em moldes metálicos de (Ø5X10) cm e tempo de cura de 7 dias em temperatura ambiente de acordo com Silva (2011).

2.3 Dosagem do Concreto de Cimento Geopolimérico (CCG)

Para o traço final, dispo de estudos preliminares de pasta [11] e argamassa, que determinaram o consumo de aglomerantes e o cálculo final para o conteúdo de agregados. Os estudos para o CCG foram feitos a partir da composição da Tabela 1, que apresenta o percentual mássico do Concreto de Cimento Geopolimérico (CCG). Para a determinação de consistência do concreto fresco utilizou-se o método de abatimento de tronco de cone, tanto para o CCG e CCP, possuindo descrição na NBR NM 67 (1998).

Tabela 1. Características do CCG

Características do concreto	Consumo
MKL & EAF (Kg/m ³)	459
Areia (Kg/m ³)	855
Brita 0 (Kg/m ³)	808
Relação a/c (água/cimento)	0,42
Abatimento (mm)	110

2.4 Dosagem do concreto de cimento Portland (CCP)

A dosagem de Concreto de Cimento Portland (CCP) foi realizada segundo os procedimentos de [13], foi utilizado o mesmo consumo de aglomerante, e a mesma relação de a/c de 0,42. Suas características são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características do CCP

Características do concreto	Consumo
Cimento (kg/m ³)	459
Areia (kg/m ³)	897
Brita (kg/m ³)	831
Relação a/c	0,42
Abatimento (mm)	80

2.5 Confeção dos corpos de prova cilíndricos

Foram moldados 4(quatro) corpos-de-prova (CP's) cilíndricos de (Ø10X20) cm, para a determinação da resistência à compressão na idade de 7, tanto para CCP quanto para o CCG. A moldagem foi feita segundo a Norma 5738 (2015), cobertos por filme plástico para não houve perda de água de hidratação do CCG, conforme é apresentada na Figura 3.

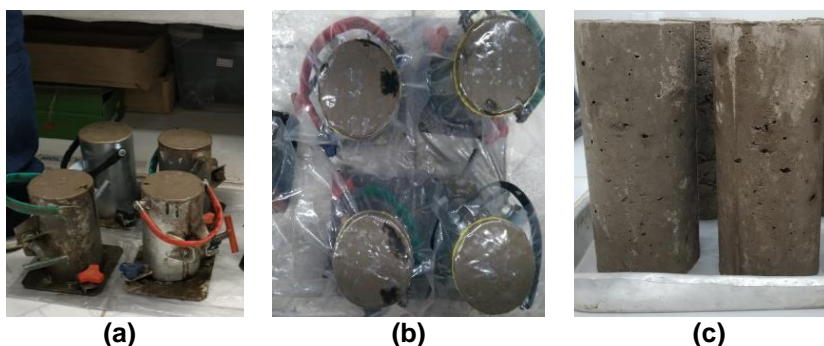


Figura 3. Confeção dos corpos de prova (Ø10X20) cm: (a) CP's moldados de CCP, (b) CP's de CCG com cobertura com plástico e (c) desmoldagem dos CP's após 24 Horas.

2.6 Ensaios de resistência à compressão e análises Microestruturais através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os ensaios de resistência à compressão axial, foram realizados conforme NBR 5739 (2018), utilizando-se uma prensa hidráulica da marca EMIC, com capacidade para 200 toneladas, no Laboratório de Construção civil do IFPA. As amostras para a análise em MEV foram extraídas das superfícies de fratura dos corpos-de-prova após o rompimento nos ensaios mecânicos, estes foram realizadas no Laboratório de Caracterização do IFPA, utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura MEV equipamento de modelo VEGA 3 SBU da TESCAN com voltagem de 20 kV acoplado com sistema de micro análise EDS, modelo AZTec Energy X-Act resolução 129 eV, marca Oxford e metalizador de amostras, marca QUORUM, modelo Q150R ES.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estudos preliminares da argamassa Geopoliméricas

Para o estudo do CCG, houve a necessidade de realizar estudos para os percentuais de areia, através dos resultados preliminares de argamassa. A areia tem função estrutural na argamassa, ganhando coesão pela ligação dos seus grãos ligantes, tais propriedades da areia como a dureza, a forma dos grãos, a granulometria e a porosidade alteram as características da argamassa. Além disso,

a origem e o estado de limpeza da areia influenciam nas principais características da argamassa [14].

No Gráfico da Figura 4 apresenta a resistência à compressão por percentual aplicado de areia.

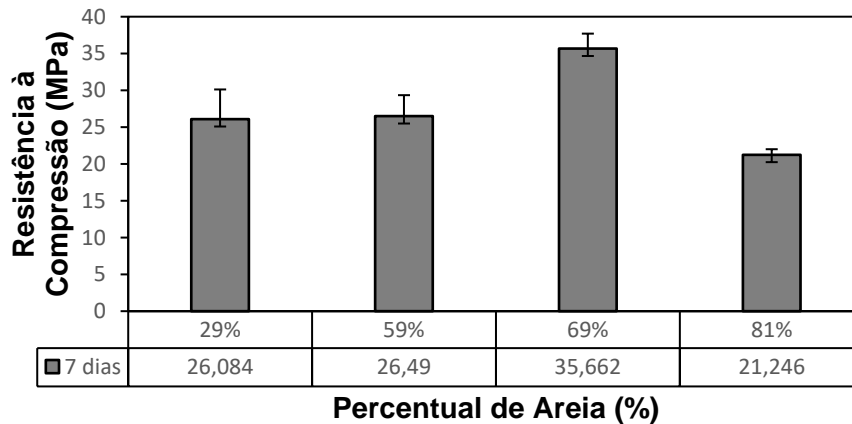


Figura 4. Resistência à compressão da argamassa geopolimérica com 45% de EAF variando os percentuais de Areia

De acordo com a Figura 4 é possível observar que o percentual de 69% de areia obteve 35,6Mpa, apresentado resistência superior as demais. Esta argamassa apresentou consistência, plasticidade e aderência que resultou maior ganho de resistência em relação a argamassa do cimento Portland. Para os estudos de argamassa geopolimérica, o resultado ideal encontrado foi de 60% em areia [12], para [13,15] os percentuais ideais variam dependendo de sua aplicação, entre 30% a 75% em massa de areia. Assim o resultado encontrado através do estudo da argamassa geopolimérica deste trabalho se encontram nos limites descritos por estes autores, com finalidade de aplicação em concreto.

A Figura 5 apresenta a análise microestrutural da superfície da argamassa geopolimérica com 69% de areia, obtidas por MEV. Foram feitas análises da superfície externa do geopolímero por estar em contato com ambiente e foram feitas ainda imagens da superfície interna da argamassa com intuito de observar sua homogeneidade.

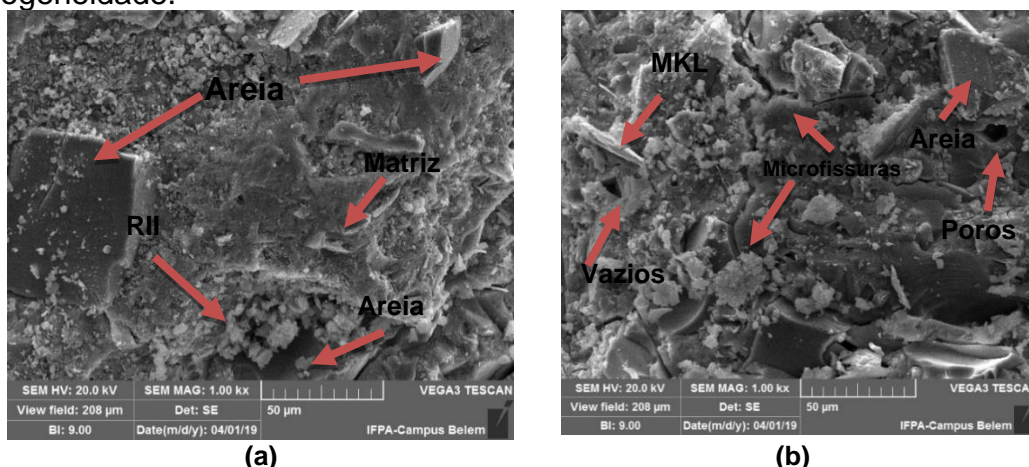


Figura 5. Análise de micrografia da Argamassa 69% de areia (MEV): (a) micrografia da superfície externa CP (1000x); (b) micrografia da superfície interna do CP (1000X).

De acordo com imagens obtidas das superfícies do geopolímero após rompimento, a Figura 5a e 5b apresentam uma microestrutura típica do geopolímero

(compacta e amorfa), sem formação de fases distintas, comparando com o Portland que apresenta mais de uma fase [11]. Na figura 5a apresenta a superfície externa do corpo de prova, por possuir um processo de cura mais intenso, evidenciando assim uma matriz homogênea e compacta, sem formação de outras fases, apresentando uma Região Interfacial (RI) da matriz e agregado com boa adesão sem nenhuma fissura nesta região. A Figura 5b, apresenta a superfície interna da argamassa, contendo pequenos vazios e poros, apresentando também partículas de metacaulim (MKL) não reagido podendo ser explicado pelo processo de mistura, não sendo suficiente para solubilizar todas partículas sólidas, também apresenta microfissuras que já eram esperadas devido ao ensaio de compressão. As argamassas geopoliméricas à base de escória granulada de alto-forno apresentam menor porosidade que a argamassa de cimento Portland [16].

Diante dos estudos preliminares, onde a avaliação foi realizada com ensaios de compressão e microscopia, foi possível observar que o percentual de escória de Alto forno com 45% [11] e o percentual encontrado nesse estudo foi de 69% de areia, como mostrada na Figura 4 para resistência, foram os percentuais ideais usados para a matéria-prima, para a dosagem do Concreto de Cimento Geopolimérico prescritos na Tabela 1.

3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO PARA O CCG E CCP

Para o estudo da resistência à compressão, de acordo com requisitos mínimos normativos da ABNT NBR 6118 (2014), foram realizados ensaios de compressão de 7 dias no CCG e os resultados foram comparados com os resultados do CCP, conforme a Tabela 3 e o Gráfico da Figura 6.

Tabela 3. Resultados do ensaio de compressão do CCG e CCP com 7 dias.

Concreto	CCP f_c (Mpa)	CCG f_c (Mpa)
1	43,25	42,89
2	45,68	41,76
3	44,97	42,27
4	43,44	42
Média	44,33	42,23
Desvio (S_d)	$\pm 0,99$	$\pm 0,35$

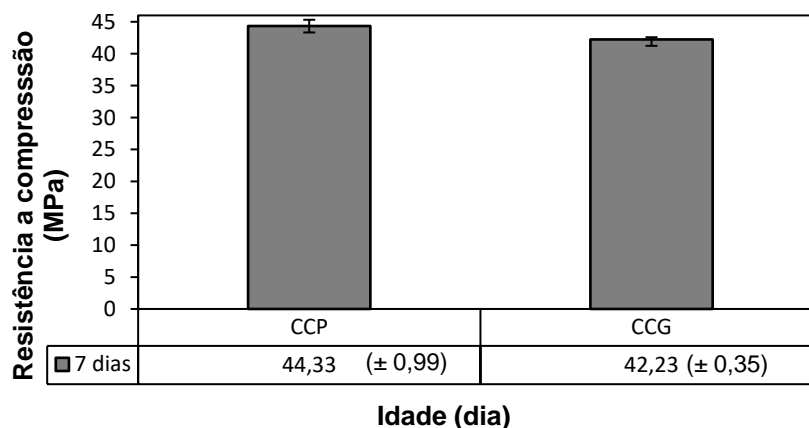


Figura 6. Relação entre a resistência compressão com idade de 7 dias

Verifica-se que o resultado médio obtido na Tabela 3 e no Gráfico da Figura 6 para a referida mistura de CCG foi de 42,23 MPa, indicando que este atendeu às especificações normativas, para concreto de alta resistência inicial. Os resultados de resistência a compressão, mostram que na idade de 7 dias o Concreto de Cimento Geopolimérico apresenta desempenho mecânico similar ao desempenho do Concreto de Cimento Portland.

Fazendo relação com a água de amassamento (abatimento de tronco de cone) (Tabela 1), no concreto a água é um ingrediente necessário para as reações de hidratação do cimento, agindo como o agente que dá a plasticidade aos componentes da mistura do concreto [17]. Pode-se dizer, que está diretamente ligada com o resultado de resistência à compressão do CCG com 110 ± 10 mm, por se apresentar consistente e não tão fluida, havendo boa coesão entre os elementos, permitindo o controle da trabalhabilidade do concreto geopolimérico, sendo está superior ao do CCP que se apresentou com menor fluidez, com 80 ± 10 mm.

Quando há grande dissolução do metacaulim com a escória de alto forno, favorece a geopolimerização. A grande quantidade de sílica e óxido de cálcio, se apresentou superior ou igual à de óxido de alumínio presente na formulação. Os cátions Ca^{+2} estabilizam a cadeia, e neutralizam as cargas negativas de dois alumínios de uma só vez, densificando as estruturas geopoliméricas. Fazendo o cálcio desempenhar um notável aumento da resistência mecânica [5].

3.2 Análise microestrutural dos CCG e CCP (MEV)

Foram realizadas análises microestruturais do CCG presentes na Figura 7, visando observar a morfologia e as características da Região Interfacial (RI) dos agregados com a matriz geopolimérica. Para efeito comparativo também foram realizadas análises microestruturais para CCP (figura 8).

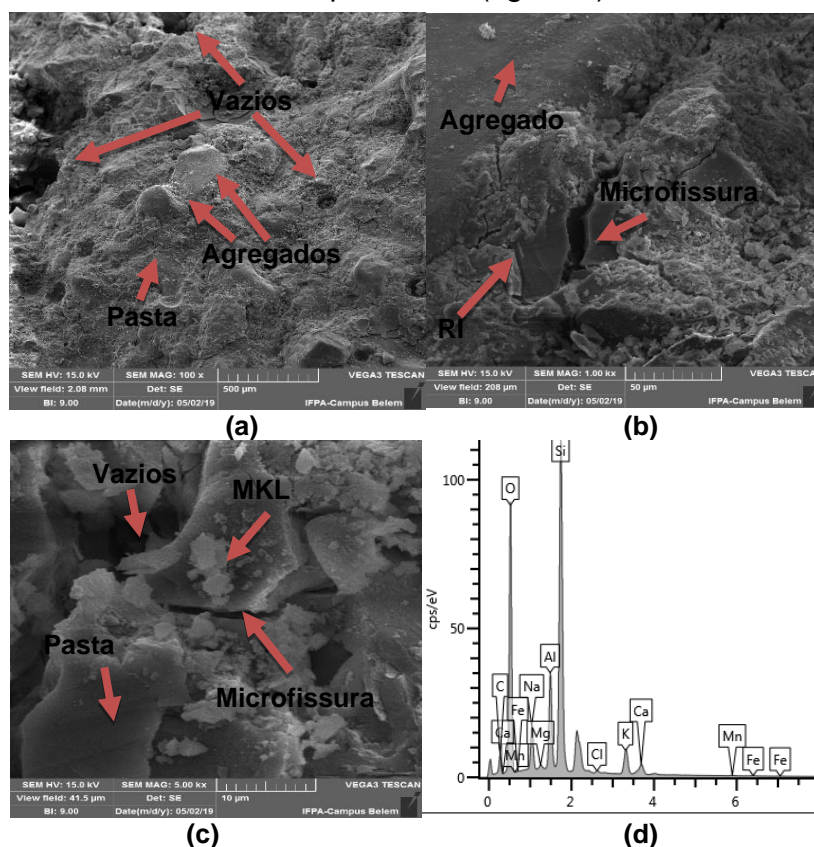


Figura 7. Micrografias das superfícies do concreto CCG com 7 dias. (a) Aumento de 100X (b) Aumento de 1000X (c) Aumento de 5000x (d) EDS.

As micrografias na Figura 7, apresentam as morfologias características do CCG. No entanto, nas micrografias de ambos os concretos, verifica-se a ocorrência da superfície de ruptura irregular, o que é uma particularidade dos concretos [18]. Observa-se que a matriz de cimento geopolimérico é constituída de uma única fase, não apresentando morfologia definida.

Na micrografia da Figura 7b apresenta o aspecto microestrutural de uma região da interface pasta-agregado da amostra do concreto. Ressaltando-se a Região interfacial (RI), a interface do agregado miúdo com a matriz geopolimérica apresenta uma zona de transição de boa aderência, não contendo formação de hidróxido de cálcio (Portlandita) nas interfaces. Com objetivo de entender a composição da superfície do CCG, foi realizada uma análise espectral da superfície da amostra por EDs, indicando os principais elementos constituintes, apresentada na Figura 7d. De acordo com a análise de EDS, foi possível determinar que os maiores percentuais encontrados foram os elementos de Silício com 48,96%, Alumínio com 5,85% e Cálcio com 1,52%, sugerindo que estes compostos são provenientes do MKL e EAF [11].

Como característica geral do CCG, este apresenta microestrutura menos porosa e mais maciça que a microestrutura do Concreto de Cimento Portland, apresentadas nas micrografias da Figura 8.

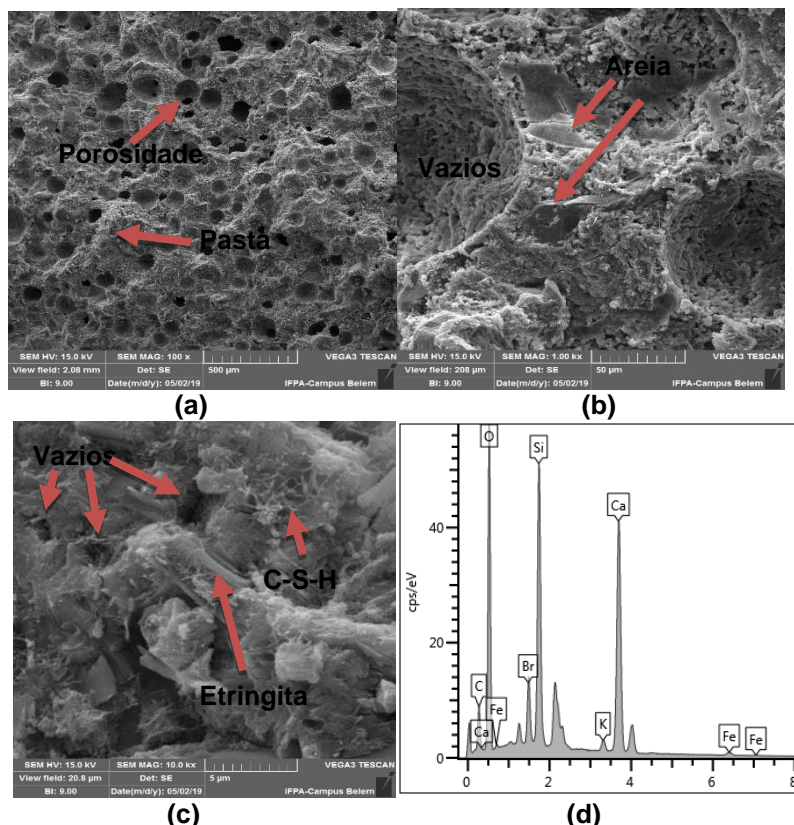


Figura 8. Micrografias das superfícies do concreto CCP com 7 dias. (a) Aumento de 100X (b) Aumento de 1000X (c) Aumento de 10.000x e (d) EDS

As figuras 8a e 8b revelam quantidades significativas de poros e vazios na estrutura do CCP maiores que no CCG, possivelmente atribuído a moldagem do Concreto. A reação química de hidratação do cimento Portland ocorre com redução

de volume, dando origem a poros, cujo volume é da ordem de 28% do volume total do gel. A estrutura interna do concreto se apresenta bastante heterogênea, adquirindo formas de retículos espaciais de gel endurecido (cristais), de grãos de agregados graúdos e miúdos de várias dimensões, envoltos por grandes quantidades de poros e capilares, que são portadores de água e por ar aprisionado no concreto [18].

Verifica-se na Figura 8c a formação de outras duas fases, possivelmente Etringitas que são produtos da hidratação de aluminatos que se formam nas primeiras horas de hidratação, estes são cristais que fragilizam o concreto, os quais são porosos e com baixas resistências. Há formação também de cristais de C-S-H que são estruturas fibrilares, indicada na micrografia, que tem a composição $C=CaO$, $S=SiO_2$ e $H=H_2O$, estes apresentam excelentes resistências mecânicas e químicas dentro do CCP, a morfologia dos seus cristais dependem das condições de cura [19,20].

A Figura 8d (EDS), expõe os picos principais dos elementos presentes na superfície do CCP, sendo evidenciados o Silício com 49,18%, Cálcio com 20,23%. A presença maior do cálcio, comparado ao CCG, pode justificar a sua instabilidade e fragilidade, por ter mais fases contendo cálcio.

4 CONCLUSÃO

- Os resultados obtidos através de ensaio de resistência à compressão e análise microestrutural mostrou que, a melhor composição encontrada para o teor de areia na argamassa geopolimérica, foi de 69% com resultados de 35 MPa.
- Os resultados obtidos de resistência à compressão do Concreto de Cimento Geopoliméricos foi de aproximadamente 42 MPa, resultado similar quando comparado ao de Concreto de Cimento Portland, que se enquadram na norma NBR 5733, que trata de cimento de alta resistência inicial.
- Os resultados de caracterização microestrutural revelaram que o Concreto de Cimento Geopolimérico apresentou uma única fase de aluminossilicato contendo potássio e cálcio. Além disso, apresentaram boa aderência da interface matriz e agregados, não apresentando formação de outras fases como os cristais de C-S-H e Etringita presentes no CCP.

Os resultados apresentam boas propriedades mecânicas e microestruturais do CCG para aplicação em obras civis que demandam materiais que alcancem altas resistências nas idades iniciais, podendo ser aplicados nas indústrias de pré-moldados e pavimentação.

REFERÊNCIAS

- 1 CASCAES, M.E.L. Desenvolvimento de geopolimeros a partir do uso de metacaulim e cinza de casca de arroz. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Joinville, 2016.
- 2 CANDIDO, V. S., SILVA, R A., SIMANASSIB, T. N. Mechanical and microstructural characterization of Geopolymeric concrete subjected to fatigue. 566-570p. Revista Journal of Materials Research and Technology. 2018.
- 3 DAVIDOVITS, J. Geopolymer chemistry and properties. Proceedings of 88 Geopolymer Conference. 1988.
- 4 DAVIDOVITS, J. Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials, J. Thermal Analysis, 1991.
- 5 MOURA, J. Desenvolvimento de geopolímero a partir de cinza de olaria, refratário dolomítico post-mortem e metacaulim. 57p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais.,

- Instituto de Geociências e Engenharias, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, 2014.
- 6 Pereira, D. S. T., Silva, F. J., Porto, A.B., Monteiro, S. N., Candido, V. S., Silva, A. C. R., Análise Microestrutural entre o concreto geopolimérico e concreto Portland. 72º congress annual da ABM. ISSN 2594-5327. Vol 72 – 2017
 - 7 Bigno, I. C. Geopolímeros à base de resíduos agrícolas e agroindustriais. Tese (Doutorado)-Curso de Doutorado em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008:p.280.
 - 8 Santos, P.S. Tecnologia de argilas aplicada às argilas brasileiras. Fundamentos. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1975. V. 1. 340 p.
 - 9 AZIMI, E. A., ABDULLAH, M. M., MING, L. Y., YONG, H. C., HUSSIN, K., & AZIZ, I.H. Processing and Properties of Geopolymers of Geopolymers as Thermal Insulating Materails: A Review. Reviws on Advanced Materials Science, Vol. 44 - Nº 3, 273-285, 06 de AGOSTO de 2016.
 - 10 AcelorMittal Tubarão. Escória Granulada de Alto-Forno [acesso em 25 mar. 2019]. Disponível em: <http://tubarao.arcelormittal.com/produtos/coprodutos/escoria-granulada-alto-forno/index.asp>
 - 11 PORTO, A. B. R., Candido, V. S., Monteiro, S. N., Silva, A. C. R. Estudo das propriedades termomecânicas de geopolimeros produzidos a partir de metacaulim. p. 864-872. In: 73º Congresso Anual da ABM, São Paulo, 2018. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/1516-392X-31513.
 - 12 SILVA, A. C. R., Compósitos geopolimérico com fibra de carbono para reforço de estruturas de concreto. Tese de Doutorado em Ciência dos Materiais - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011.
 - 13 HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. 1993. 349p. 1 ed. São Paulo: Pini, 1993.
 - 14 CUNHA, M. J. M. Durabilidade de Geopolímeros Monofásicos. 2013. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia. Universidade do Minho. Braga. 2013.
 - 15 ARAUJO L., MEET L. B. R., LABRICHA A. J., SENFF L. Desenvolvimento de Geopolimeros a partir de residuos de construção como agregado. 8º Forum Internacional de Residuos Solidos. Curitiba – PR. 2017.
 - 16 Souza, L. G. Geopolímeros à base de resíduos Industriais. Tese de Doutorado em Ciência dos Materiais - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.
 - 17 MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto Estrutura, Propriedades e Materiais. Ed.:PINI. ISBN.: 85-7266-040-2. Português, p. 573. 1994.
 - 18 SILVA, A. C. R., Comportamento do concreto geopolimérico para pavimentação sob carregamento cíclico. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.
 - 19 MEDEIROS, M. Materiais de Construção I Material de aula: Grupo de docentes – Materiais de Construção - Departamento de Construção Civil – UFPR - Acesso em 04/05/2019 <http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/e/e2/EstruturaInternaMarcelo.pdf>.
 - 20 SILVA, A. C. R., “Concreto geopolimérico para pavimento: uma alternativa ecológica para a indústria do cimento”, Seminário sobre a indústria e o meio ambiente, Instituto Militar de Engenharia, <http://transportes.ime.eb.br> Rio de Janeiro, 2006b.