

SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE GEOPOLÍMEROS UTILIZANDO ARGILA CAULÍNÍTICA E ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA COMO PRECURSORES *

Beatriz Cordeiro de Bona¹

Vinicius Lemos Pereira²

Isaac Gabriel Peixoto Borges de Oliveira²

Vanessa Cordeiro de Bona³

Ponnyk Melo Torres⁴

Dilson Nazareno Pereira Cardoso⁵

Clesianu Rodrigues de Lima⁶

Resumo

A deposição da escória de aciaria elétrica (EAE) é um problema ambiental da indústria produtora de aço. Com o intuito de dar finalidade a este resíduo, foi desenvolvida a síntese de geopolímeros através de uma mistura composta de argila caulínítica (MBA), EAE, hidróxido de sódio (NaOH), silicato de sódio alcalino aquoso (SSAA) e água. Inicialmente, a escória e a argila foram selecionadas, moídas, peneiradas e analisadas por meio difração de raios-X, fluorescência de raios-X e granulometria a laser. Com a MBA calcinada, a 600°C por 2 h, adicionando EAE (40 e 30% da mistura sólida), e a mistura líquida (NaOH, SSAA e água), produziu-se dois traços de geopolímeros. Os corpos de prova geopoliméricos produzidos foram curados à temperatura ambiente (28°C) durante 7 e 28 dias. Após a cura, foram caracterizados por meio da análise de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade, porosidade aparente e densidade. Constatou-se, que o geopolímero com 30% de EAE apresentou melhor resistência à compressão em relação ao de 40%. A EAE apresentou um resultado favorável ao seu uso como precursor na síntese de geopolímeros, para a aplicação na construção civil, reduzindo os possíveis impactos ambientais do depósito deste resíduo.

Palavras-chave: Geopolímero; Argila caulínítica; Escória de aciaria elétrica.

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF GEOPOLYMERS USING KAOLIN CLAY AND ELECTRIC STEELMAKING SLAG AS FORERUNNERS

Abstract

The deposition of electric steelmaking slag (EAE) is an environmental problem of the steel producing industry. In order to give purpose to this residue, the synthesis of geopolymers was developed through a mixture composed of kaolin clay (MBA), EAE, Sodium hydroxide (NaOH), alkaline aqueous sodium silicate (SSAA) and water. First, slag and Clay were selected, grinded, sifted and analyzed by means of X-ray diffraction, X-ray fluorescence and laser granulometry. With the calcined MBA, at 600°C for 2 hours, adding EAE (40 and 30% of the solid mixture), and the liquid mixture (NaOH, SSAA and Water), two traces of geopolymers were produced. The geopolymeric specimens produced were cured at room temperature (28 °C) for 7 and 28 days. After curing, they were characterized by the analysis of resistance to axial compression, water absorption by capillarity, apparent porosity and density. It was found that the Geopolymer with 30% of EAE presented better compressive strength compared to 40%. The EAE presented a favorable result to its use as a precursor in the synthesis of geopolymers, for the application in civil construction, reducing the possible environmental impacts of the deposit of this residue.

Keywords: Geopolymer; Kaolinitic clay; Steel slag.

¹ Graduanda em Engenharia de Materiais, FEMAT, UNIFESSPA, Marabá/PA, Brasil.

² Graduando em Engenharia Civil, FAEC, UNIFESSPA, Marabá/PA, Brasil.

³ Mestranda em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento, UFPA, Marabá/PA, Brasil.

⁴ Engenheira Civil, Faculdade Metropolitana de Marabá, Marabá/PA, Brasil.

⁵ Engenheiro Químico, Tec., Faculdade de Engenharia Química, UFPA, Belém/ PA, Brasil.

⁶ Engenheiro Químico e Civil, Prof., Faculdade de Química, UNIFESSPA, Marabá/PA, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O tipo de cimento mais conhecido e amplamente utilizado para a produção de materiais de construção civil é o Cimento Portland (CP) [1]. Porém, ao longo das últimas décadas muitos questionamentos surgiram quanto ao uso do CP, tendo em vista a enorme quantidade de matérias-primas demandadas em sua fabricação, assim como, a emissão excessiva de carbono resultante do mesmo processo [2]. Dentre as soluções estudadas para mitigar o impacto ambiental associado ao uso do concreto de CP na construção civil, destaca-se o uso de cimentos geopoliméricos [3].

O cimento geopolimérico pode ser definido como um polímero inorgânico, constituído de polissilatos, abreviatura de poli-sílico-aluminatos [4], que pertencem aos filossilicatos, uma subclasse da família dos minerais silicatados, que se caracterizam por apresentar, entre outras coisas, folhas tetraédricas paralelas, alta dureza e capacidade de troca catiônica [5].

Os geopolímeros são obtidos, essencialmente, por policondensação – um tipo de reação de polimerização caracterizada pela liberação de água. Para formação do cimento geopolimérico, necessita-se da presença de silicatos de alumínio ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) amorfos em meio altamente alcalino, que é, geralmente, proporcionado por uma solução aquosa de silicato e/ou hidróxido [6].

A obtenção do metacaulim ocorre mediante calcinação do caulim, um silicato aluminoso hidratado, cuja constituição química se aproxima de $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. O caulim é formado por, cerca de, 45% de SiO_2 , 40% de Al_2O_3 , 14% de H_2O e outros elementos em menor quantidade, como ferro, titânio, manganês, magnésio, potássio e sódio [7].

Um dos principais responsáveis pela degradação ambiental são os resíduos gerados pela indústria siderúrgica e entre eles se encontra a Escória de Aciaria Elétrica (EAE). Maior atenção tem-se dado à adequada destinação dos resíduos gerados nos processos industriais. Para diminuir impactos causados por rejeitos como a EAE, a reutilização em novos materiais ou como parte de materiais já existentes é a maneira mais promissora de alcançar bons resultados. O setor da construção civil se apresenta como o maior aliado, por conta dos altos índices de consumo de materiais [8].

O processo de produção do cimento geopolimérico gera uma redução de 75 a 90% nas emissões de dióxido de carbono em comparação ao processo do CP [9]. Na sua produção podem ser utilizados tanto resíduos como materiais precursores, quanto por meio da imobilização de resíduos perigosos (tóxicos, radioativos e metais pesados) que são encapsulados ao serem adicionados ao cimento geopolimérico como “carga” [10-11-12].

De modo geral, os geopolímeros possuem atributos suficientes para diversas aplicações. Entre as principais propriedades, destacam-se: rápido endurecimento, resistência ao fogo, excelente resistência mecânica [13], elevada durabilidade, boa resistência aos ácidos, baixa condutividade térmica e ausência ou reduzida reação álcali-agregado [14].

Dentre as aplicações dos cimentos geopoliméricos, têm-se estruturas pré-fabricadas, pavimentos de concreto, cerâmicas refratárias [13]. Além disso, podem ser utilizados para conter e/ou imobilizar metais pesados e radioativos, sobretudo, devido as propriedades de troca iônica, presentes nos geopolímeros [15].

Neste trabalho, foi produzido um geopolímero a partir do metacaulim obtido pela calcinação de uma argila caulinítica, EAE e dos ativadores: hidróxido de sódio e

silicato de sódio alcalino. A argila e a escória foram caracterizadas e analisadas quantitativamente antes da síntese dos geopolímeros.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Para a formulação do geopolímero foram utilizadas as seguintes matérias-primas: Argila Caulinítica (MBA), Escória de Aciaria Elétrica (EAE), Hidróxido de Sódio (NaOH), Silicato de Sódio Alcalino Aquoso (SSAA) e Água. Os equipamentos e técnicas empregadas foram: moinho de mandíbulas, moinho de bolas, balança analítica, peneira, argamassadeira eletromecânica digital (AMC), moldes de tubos PVC, fluorescência de raios-X, difração de raios-X e análise de granulometria a laser.

O geopolímero foi obtido a partir da reação de policondensação, denominada geopolimerização. Na policondensação ocorreu a dissolução da sílica e alumina por um meio alcalino, quebrando as ligações originais da matéria-prima, formando um gel, que foi convertido numa malha tridimensional de silico-aluminato. Após a formação do gel, ocorreu à reorganização e conseqüentemente a polimerização e endurecimento da argamassa [16][17].

Após 7 e 28 dias de cura, o geopolímero foi submetido a técnicas de caracterização, dentre elas, resistência a compressão axial, absorção de água por capilaridade, porosidade aparente e densidade.

2.1.1 Procedimento experimental

Inicialmente a argila caulinítica e a escória de aciaria elétrica foram submetidas a análise química por fluorescência de raios-X e análise de granulometria a laser. Em seguida, foi calculado o traço das matérias-primas utilizadas na geopolimerização, obtendo uma razão sólido/líquido igual a 2, razão de volume de SSAA e volume de NaOH igual a 2,5, com uma concentração de NaOH igual a 7,5 M. Na amostra A foi utilizado 40% de escória de aciaria e na amostra B foi usado 30% em relação a massa total de material sólido, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Traço das matérias primas utilizadas na formulação dos geopolímeros.

Amostra	Argila	EAE	V_{SSAA}/V_{NaOH}	Sol/Liq
A	60%	40%	2,5	2,0
B	70%	30%	2,5	2,0

A EAE foi cominuída em moinho de mandíbulas e posteriormente em moinho de bolas, em seguida, peneirada em uma peneira de 65Mesh. A argila caulinítica foi calcinada a uma temperatura de 600°C por 2 horas em forno mufla com o objetivo de gerar o metacaulim, uma fonte de sílica e alumina ideal para formação de geopolímeros. Posteriormente, as matérias-primas sólidas foram misturadas. A mistura líquida, composta por NaOH, SSAA e H₂O, foi adicionada à mistura sólida e levadas a argamassadeira por 4 minutos. Após esse período a mistura foi colocada em moldes de tubos de PVC de 50 mm de diâmetro por 100mm de altura. Os traços foram realizados em triplicatas. Passados 7 e 28 dias, as amostras A e B foram submetidas às técnicas de caracterização.

2.1.2 Comportamento mecânico – Resistência à compressão axial

A resistência à compressão representa a tensão máxima desenvolvida na superfície de um corpo de prova de um material rígido quando submetido a uma carga axial [18]. No ensaio de compressão, os corpos de prova A e B foram colocados sobre um prato inferior plano e outro prato superior plano fazendo o carregamento de forma igualitária em toda a superfície do corpo de prova, e a sua tensão de compressão na ruptura é calculada pela Equação 1 [19].

$$R = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Onde:

R – tensão de ruptura (MPa);

P – força aplicada (KN);

A – área da superfície sob pressão (mm²)

2.1.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade é descrito pela norma brasileira [20]. Os corpos de prova de cimento geopolimérico foram inicialmente secos e colocados em contato com uma lâmina d'água em sua extremidade inferior, e seu ganho de massa monitorado em função do tempo, à medida que os mesmos absorvem água por capilaridade ou sucção.

Os objetivos desse ensaio foram estudar a permeabilidade do material e avaliar os poros que estão conectados, permitindo assim a penetração de água por capilaridade; seu cálculo se dá pela Equação 2 [20].

$$C = \frac{A-B}{S} \quad (2)$$

Onde:

C - absorção de água por capilaridade, em g/cm²;

A - massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em g;

B - massa do corpo-de-prova seco, assim que este atingir a temperatura de (23 ± 2)°C, em g;

S - área da seção transversal, em cm².

2.1.3 Porosidade Aparente

A porosidade aparente visa caracterização física de materiais cimentícios em seu estado endurecido. Esses dados são importantes para a estimativa das propriedades relacionadas a durabilidade do material, haja visto que quanto mais poroso, mais sujeito estará a agentes prejudiciais à sua integridade estrutural [20].

A porosidade “p” do cimento geopolimérico foi obtido pelo pela Equação 3 [20].

$$p = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \quad (3)$$

Onde:

p – porosidade (%);

m₁ - massa da amostra seca (g);

m₂ – massa da amostra submersa saturada (g);

m₃ – massa da amostra saturada com superfície seca (g).

2.1.4 Densidade

A massa (M) e o volume (V) são propriedades gerais de um corpo material. Densidade absoluta (densidade d) ou massa específica (ρ) de um corpo homogêneo é a razão entre sua massa M e seu volume V. Ela pode ser expressa em quilograma por metro cúbico (kg/m^3) ou grama por centímetro cúbico (g/cm^3) [21]. A densidade pode ser calculada pela equação 4.

$$d \text{ ou } \rho = \frac{M}{V}, \text{ onde } M = \rho V \text{ e } V = \frac{M}{\rho} \quad (4)$$

2.2 Resultados e Discussões

2.2.1 Composição química das matérias primas (MP's)

Como pode ser visto na Tabela 2, a análise química da argila caulínica revelou a presença de altas quantidades de SiO_2 , Al_2O_3 e quantidades menores de outros componentes, de acordo com os dados disponíveis na literatura [22] [23] [24].

Tabela 2. Análise química por fluorescência de raios-X.

Composição %	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	MnO	SrO	Na_2O	K_2O	ZrO_2
MBA	58,138	37,348	2,068	0,713	0	0	0,006	0	0,94	0,043
EAE	17,435	3,92	12,702	9,973	49,82	1,715	-	-	-	-
Composição %	SO_3	TiO_2	Sc_2O_3	ZnO	Cr_2O_3	K_2O	PbO	Ac	CuO	NbO
MBA	0,091	0,653	-	-	-	-	-	-	-	-
EAE	0,871	-	2,371	0,605	0,252	0,221	0,059	0,059	0,023	0,015

A análise química da escória de aciaria (Tabela 2) apresenta grandes quantidades de CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , MnO e Al_2O_3 enquanto outros óxidos foram detectados em quantidades inferiores.

2.2.2 Distribuição granulométrica das MP's

Os diâmetros médios de acordo com o resultado da análise de granulometria a laser da escória de aciaria (EAE) e da argila caulínica (MBA) podem ser observados na Tabela 3. A distribuição das partículas pode ser confirmada na Figura 1.

Tabela 3. Diâmetros das partículas.

Matéria prima	D_{50}	D_{90}	$D_{\text{médio}}$
MBA	8,54 μm	46,28 μm	27,41 μm
EAE	34,35 μm	113,18 μm	73,7 μm

Como já era de se esperar, a argila apresenta um menor tamanho de partícula, pois é uma argila caulínica, onde temos um $D_{\text{Médio}}$ de 27,41 μm , enquanto que o tamanho médio das partículas da EAE é da ordem de 2,7 vezes o da argila, que provavelmente é um fator limitante de reação, por se tratar de uma reação em meio iônico.

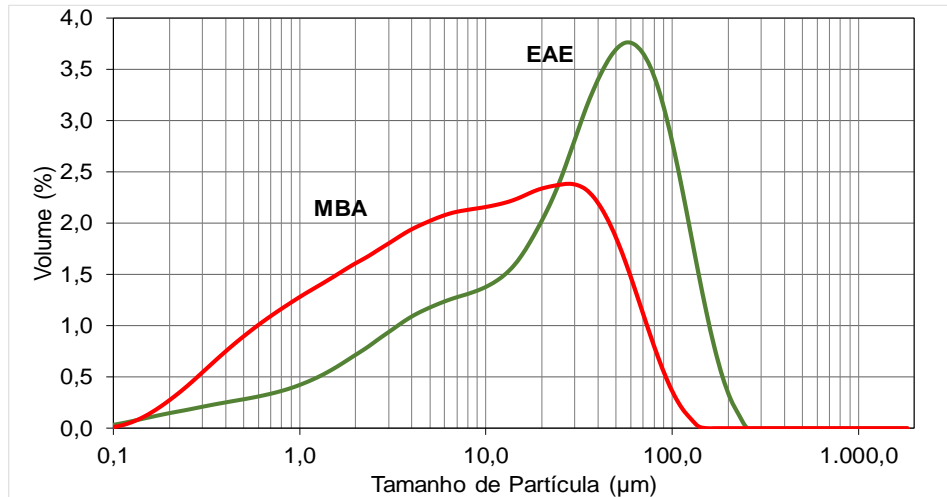


Figura 1. Análise de Granulometria a laser da escória (EAE) e da argila (MBA).

2.2.3 Composição mineralógica das MP's

No difratograma da argila, Figura 2, observa-se a presença de Hematita (Fe_2O_3) (padrão 01-089-8104), do quartzo (SiO_2) (padrão 01-086-1629) com sistema cristalino hexagonal e da fase caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$).

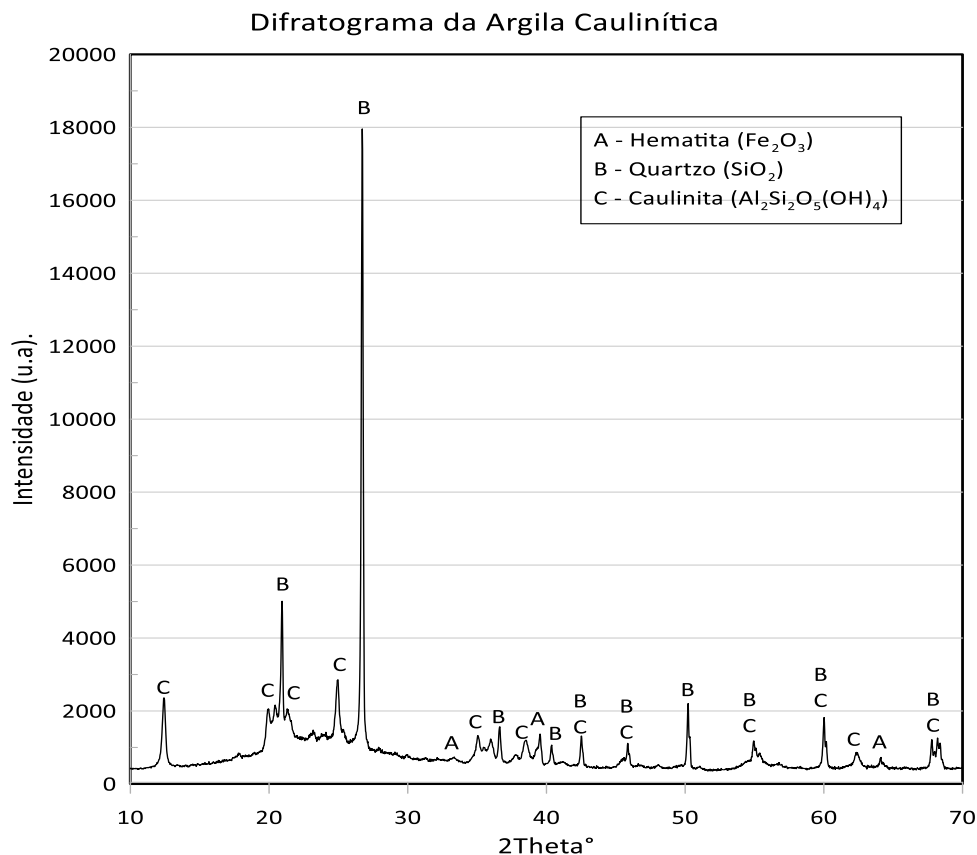
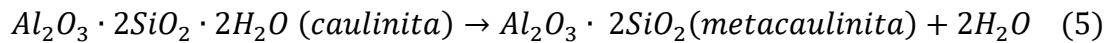


Figura 2. Difratograma de raio-X da Argila Caulinítica (MBA).

A calcinação da argila ocorre através de uma série de reações de conversão. Quando uma partícula de argila é submetida à alta temperatura no interior do reator, ela irá aquecer através da transferência de calor por irradiação e convecção. Inicialmente, caso contenha umidade, teremos a remoção da água. Com o aumento da temperatura, podem ocorrer algumas reações, dentre elas, a transformação de caulinita para metacaulinita simplificada na reação a seguir [25].



A formação da metacaulinita é importante para a aplicação nas indústrias de cimento. É necessário ao menos 90% de caulinita nas argilas para obter um metacaulim de alta reatividade [26].

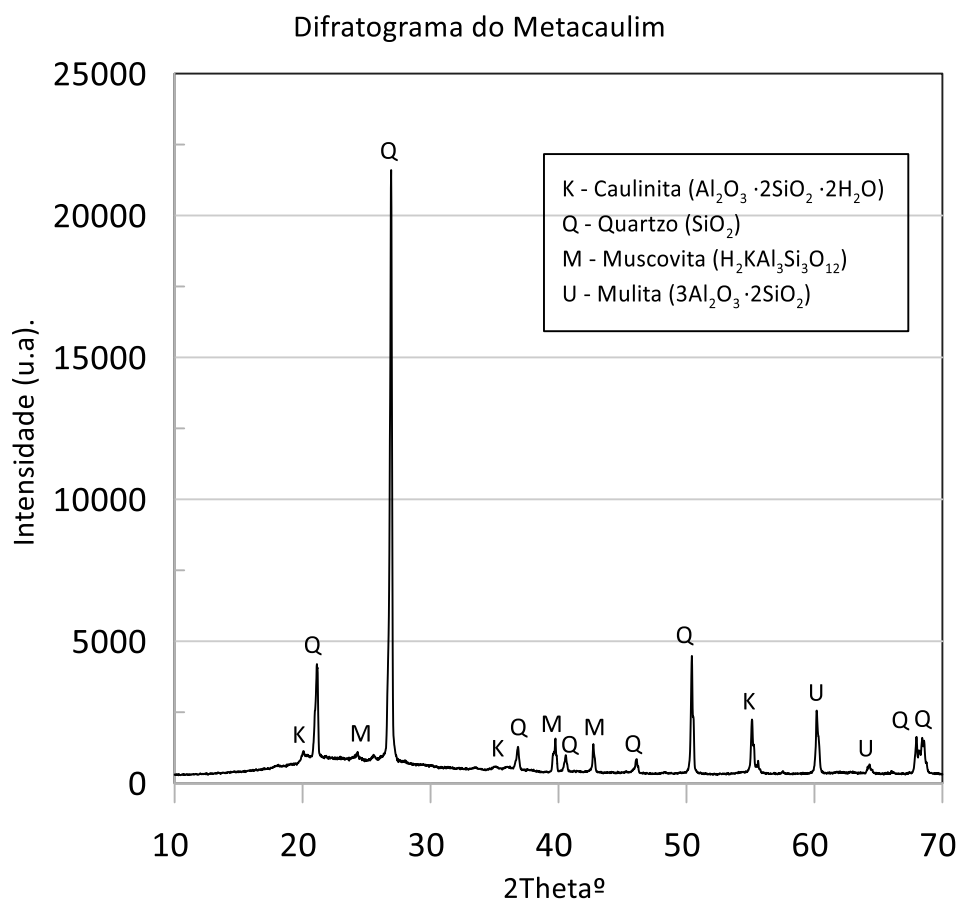


Figura 3. Difratograma de raio-X do Metacaulim.

Na Figura 3 foram identificados os picos de difração referentes a Caulinita (padrão 00-003-0052), quartzo (padrão 01-085-1053), muscovita (padrão 00-002-0058) e mulita (padrão 00-002-0415).

O metacaulim também apresentou no difratograma algum grau de amorfização na estrutura cristalina, perto dos picos característicos da caulinita [26].

Na Figura 4 foram identificados os picos de difração associados as fases cristalinas predominantemente formadas de Ca e Fe. As fases ricas em Ca são a calcita e silicato de cálcio. Já o Fe está presente na forma de magnetita (Fe_3O_4) e wustita (FeO). Picos de difração do MgO também foram identificados, indicando presença desse óxido em sua forma livre – periclásio. Os resultados obtidos na Figura 4 estão de acordo com a literatura que indicam a possibilidade de formação das fases identificadas [27] [28].

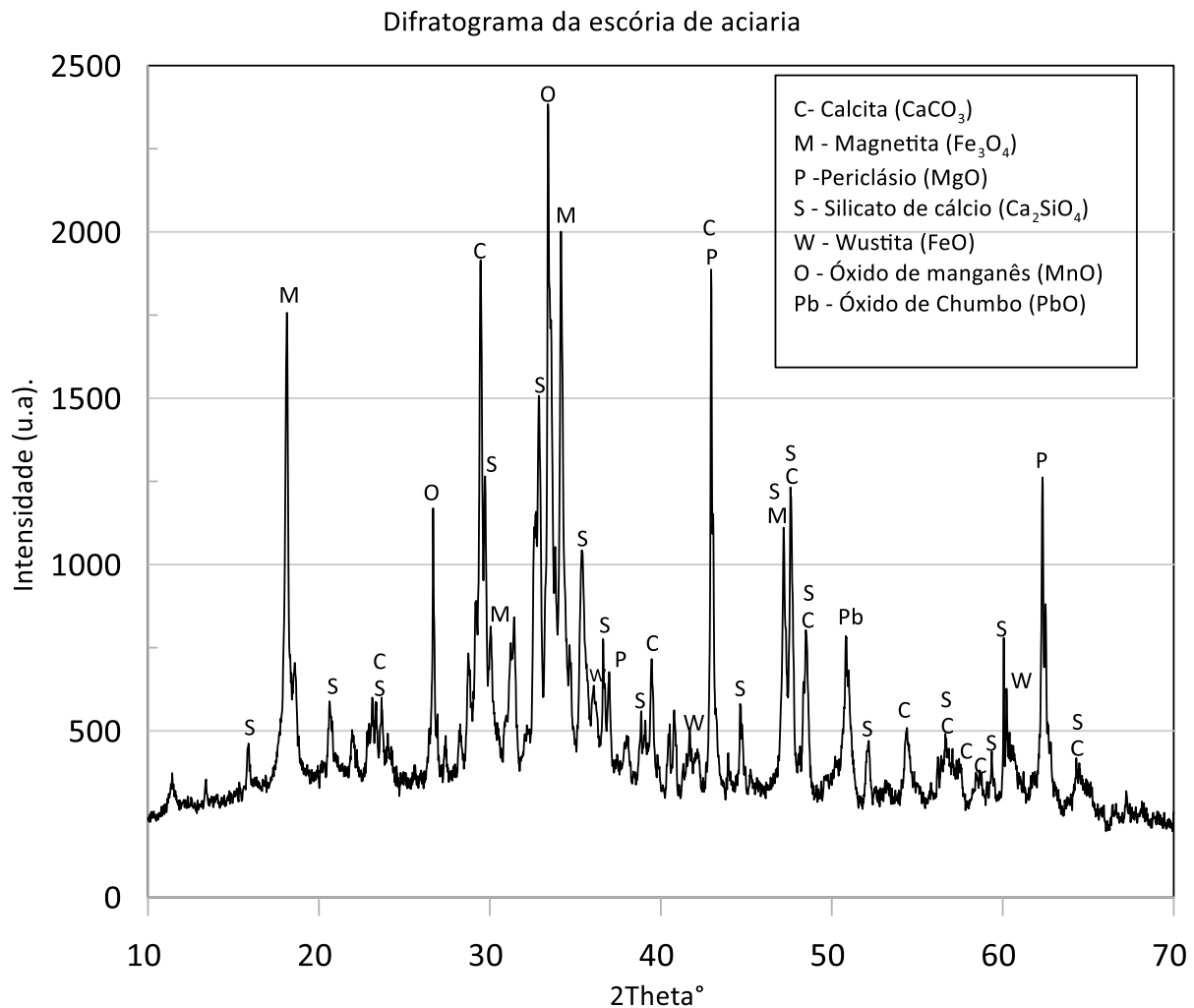


Figura 4. Difratograma de raio-X da escória de aciaria elétrica EAE.

Conforme a Tabela 2, a escória é predominantemente formada por compostos de Ca, Fe, Mg e Si. De acordo com o DRX apresentado na Figura 4, o Ca está presente na forma de silicatos complexos e também carbonato. O Mg está, na sua maior parte, presente como óxido livre. Já o Fe encontra-se nas formas reduzidas de óxidos como wustita (FeO) e magnetita (Fe_3O_4). A elevada perda ao fogo (PF) da escória é proveniente, sobretudo, da presença de carbonato de Ca [27] [28].

2.2.4 Resistência a compressão axial aos 7 e 28 dias de cura do geopolímero e resultados das análises físicas.

Nos traços A e B foram utilizados, respectivamente, 40% e 30% de escória de aciaria elétrica (EAE) em relação a massa total de material sólido (Figura 5).

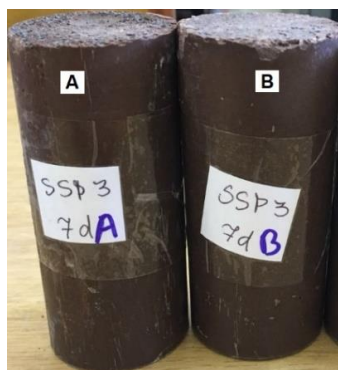


Figura 5. Cimento geopolimérico.

Tabela 4. Resultados das análises: resistência a compressão axial, absorção de água por capilaridade, porosidade aparente e densidade.

Traço	Absorção Capilaridade (%)	Desv. Pad.	Porosidade Aparente (%)	Desv. Pad.	Densidade (g/cm ³)	Desv. Pad.	Resist. Comp.(MPa)	Desv. Pad.
A - 7 dias	25,22	2,55	32,77	3,45	1,30	0,08	10,24	0,79
A - 28 dias	24,91	1,66	31,60	1,60	1,85	0,07	11,37	0,21
B - 7 dias	24,52	2,22	33,28	2,89	1,36	0,08	15,37	0,52
B - 28 dias	28,39	2,84	33,35	1,58	1,78	0,15	10,65	0,81

Constatou-se que o geopolímero B, com menor percentual de escória apresentou melhor resistência a compressão axial em um período de cura de 7 dias (15,37 MPa), porém essa resistência caiu para 10,65 MPa após 28 dias de cura (Tabela 4). O traço A manteve a resistência a compressão axial em torno de 11 MPa, considerando o desvio padrão.

Os valores de resistência a compressão obtidos neste trabalho foram relativamente baixos aos encontrados na literatura para cimentos geopoliméricos. Os cimentos geopoliméricos apresentam resistência a compressão de 15 MPa a 20°C e 22,5/24 MPa a 23/25°C em 4 horas após a sua aplicação. Aos 28 dias ultrapassa 100 MPa. O calor radiante acelera a pega e o endurecimento (a 65°C apresenta em 1 hora 6,89 MPa e em 4 horas 41,34 MPa) [29].

A resistência mecânica pode variar de acordo com alguns parâmetros, sendo eles: a distribuição do tamanho das partículas, a natureza amorfa da matéria-prima sólida, relação Si/Al, concentração do ativador, entre outros. A temperatura e o tempo de cura interferem no comportamento mecânico [30].

Neste trabalho, alguns parâmetros que podem ter influenciado no comportamento mecânico dos geopolímeros causando uma baixa resistência mecânica quando comparada a literatura foram: a utilização de hidróxido de sódio comercial adquirido em supermercado e que pode conter em sua composição impurezas; o uso de silicato de sódio alcalino barato; e utilização de uma argila caulínica com teor de

caulinita bem abaixo do caulim convencional, que é considerado o material ideal para a aplicação na síntese de geopolímeros.

Quanto a distribuição do tamanho das partículas, percebe-se que a escória e a argila caulínica utilizadas possuem granulometria de até 230 μm (peneira Tyler#65), considerada uma granulometria "grande" tendo em vista o tamanho das estruturas dos óxidos, o que pode ter levado ao surgimento de aglomerados que dificultaram as reações de geopolimerização levando à uma menor resistência do material.

A Tabela 4 também apresenta os resultados de absorção d'água por capilaridade para os traços A e B [19]. O traço A (7 e 28 dias de cura) e o traço B (7 dias de cura), apresentaram um valor em torno de 25% para a absorção d'água, já o traço B (28 dias de cura), apresentou o valor de 28,39%. Essa maior absorção de água pode ter influenciado na diminuição da resistência a compressão do geopolímero, visto que, quanto maior a capilaridade, mais susceptível o material está aos ataques químicos, sendo assim menos durável.

A porosidade aparente nos traços A e B (7 dias e 28 dias de cura), apresentou um valor em torno de 32% considerando o desvio padrão das análises. De acordo com a literatura, uma alta porosidade pode afetar as propriedades e durabilidade do material [31].

Comparando as densidades dos traços A e B, observa-se que houve um aumento considerável na densidade nos corpos de prova em relação ao tempo de cura, sendo respectivamente de 50% e 31% para os traços ensaiados. O aumento da densidade devido a absorção d'água aos 28 dias levaram a redução da resistência a compressão dos geopolímeros A e B.

3 CONCLUSÃO

A síntese dos geopolímeros com substituição de 40% (traço A) de escória foi obtida com sucesso, sendo evidenciado um resultado praticamente constante de resistência a compressão para 7 e 28 dias de cura. O traço B com substituição de 30%, demonstrou melhor resultado apresentando resistência a compressão aos 7 dias de cura com um valor de 36% superior ao traço A. Porém reduzindo seu valor aos 28 dias de cura, o que aponta uma ineficiência na reação de geopolimerização, provavelmente por conta da granulometria da EAE ser maior do que a da argila. Logo, deve-se considerar a razão sólido/líquido como fator influente na reação, bem como a concentração de hidróxido de sódio e razão NaOH/SSAA, que melhoram a dissociação dos íons para a reação de geopolimerização. Isso também pode ser observado no aumento do valor de absorção d'água, que aponta para uma menor resistência a compressão axial. A porosidade aparente manteve um valor muito próximo para os traços estudados, o que comprova que a técnica empregada na síntese dos geopolímeros contribuiu para uma boa homogeneização e moldagem dos traços. Assim, a EAE apresenta-se como um precursor com potencial na síntese de geopolímeros, com aplicação na construção civil, sendo necessário mais ensaios para obtenção da composição ideal para a síntese de geopolímeros. Desta forma, é possível dar uma destinação a este resíduo, reduzindo seus depósitos e seu impacto negativo no meio ambiente e na sociedade.

REFERÊNCIAS

- 1 Mehta PK, Monteiro, PJM. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.
- 2 Ganasini D et al. Obtenção e caracterização de cimentos de geopolímeros a partir de precursores de duas fontes de metacaulinita. 26º SIC UDESC. 2016. [acesso em 12 mai. de 2019]; 26:1-2. Disponível em: http://www1.udesc.br/arquivos/id_submenu/2551/88.pdf.
- 3 Dias DP, Thaumaturgo C. Geopolymer Cements Resistant to Aggressive Agents. Proceedings of the International Conference on the Sustainable Construction into the next millennium: Environmentally friendly and Innovative Cement Based Materials, João Pessoa, 2000.
- 4 Davidovits J. Mineral polymers and methods of making them: US n. P: 4349386, 1982.
- 5 Meier WM, Olson DH. Atlas of Zeolites Structure Types; 3. ed. rev. London, Butterworth; Heinemann, 1992.
- 6 Davidovits J, Davidovits M, Davidovits N. Process for obtaining a geopolymeric aluminosilicate and products thus obtained: US n. P: 5342595, 1994.
- 7 Monte R. Avaliação de metodologias de ensaio destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento Portland. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. 102 p.
- 8 Masuero AB. Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- 9 Davidovits J. "Geopolymer cement." A review. Saint-Quentin, France: Geopolymer Institut, 2013.
- 10 Bigno IC. Cimento Geopolimérico à Base de Resíduos Agrícolas e Agroindustriais. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2008.
- 11 Severo CGS et al. Ativação alcalina de resíduos minerais com NaOH. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 8, n. 2, 2013.
- 12 Van Jaarsveld JGS et al. The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications. Minerals Engineering, v. 10, n. 7, 1997.
- 13 Kommitsas K, Zaharaki D. Geopolymerisation: A Review and Prospects for the Minerals Industry. Minerals Engineering, v. 20, p. 1261–1277, 2007.
- 14 Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis J, Lukey G, Palomo, A, Van Deventer J. Geopolymer Technology: the Current State of the Art. Journal of Materials Science, v. 42, p. 2917-2933, 2006.
- 15 Correia, EAS. Compósitos de Matriz Geopolimérica Reforçados com Fibras Vegetais de Abacaxi e de Sisal. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFP. Paraíba, 2011. 218 p.
- 16 CESARI VF. Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio. 2015. 128 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- 17 VASSALO EAS. Obtenção de Geopolímero a partir de Metacaulim ativado. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.
- 18 ISO 604 International Organization for Standardization (2002). Plastics -Determination of compressive properties. Disponível em: <<http://www.iso.org>>. Acessado em 19 de maio de 2019.

- 19 NBR 7215- Cimento Portland- Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- 20 NBR 9779- Argamassa e concreto endurecidos- Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.
- 21 Hansmann E, Slaik EP. Physics. (Van Nostrand, New York, 1947).
- 22 Manfredini T, Pellacani GC. Engineering Materials Handbook. Ceramics and Glasses- ASTM 4(1992), pp. 925-929.
- 23 Kingery WD. Introduction to Ceramics. John Wiley and Sons Inc, New York (1976).
- 24 Rahamn MN. Ceramic, Processing and Sintering (2nd ed), Marcel Dekker, New York (2003).
- 25 Teklay A, Yin C, Rosendahl L, Bøjer M. Calcination of kaolinite clay particles for cement production: A modeling study. Cem. and Conc. Res., v. 62, p.11-19, 2014.
- 26 Soutsos M. et al. Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers. Construction and Building Materials, v. 110, p. 355–368, 2016
- 27 Filev R. Escória de aciaria. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm>. Acesso em 24 ago. 2019.
- 28 Silveira NO et al. Revista BM 1,1 (2004) 1
- 29 Wincret designer concrete products LTDA. Cimento Portland versus Ligantes Geopoliméricos Considerações econômicas sobre as implicações do mercado de carbono no custo dos concretos. Disponível em <<http://www.geopolymer.com.br/PDF/cpxgp.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2019.
- 30 Komnitsas K, Zaharaki D. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. Minerals Engineering, p.1261–1277, 2007.
- 31 NBR 9778-Argamassa e Concreto Endurecidos -Determinação da Absorção de água Por Imersão -Índice de Vazios e Massa Específica. Rio de Janeiro, 2005.