

Síntese de Geopolímeros a Partir da Utilização de Resíduos Industriais

Natália Smaniotto Bach¹; Adalberto Matoski¹; Suelen Cristina Vanzetto²

✉ natalia.smaniotto@hotmail.com

1. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba/PR

2. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim/RS

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: 08 de junho de 2025

Aceito em: 25 de janeiro de 2026

Publicado em: 30 de abril de 2026

Resumo: Geopolímeros são materiais produzidos a partir de precursores aluminossilicatos ativados em meio alcalino por geopolimerização. Neste estudo, avaliou-se o potencial de resíduos de carvão mineral e vidro como precursores. A solução ativadora continha hidróxido de sódio (NaOH) em concentrações de 10 mol/L, 12 mol/L e 14 mol/L, com silicato de sódio alcalino (Na_2SiO_3) na proporção 1:2. As pastas foram curadas a 65 °C por 24 horas e em câmara climatizada por 28 dias. Os ensaios de resistência à compressão, microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios-X (DRX) foram realizados. O traço com 25% de resíduo de carvão e 75% de vidro obteve melhor resistência à compressão (23,34 MPa) com relação líquido/sólido de 0,4 e 12 mol/L de NaOH. A MEV indicou gel aluminossilicato N-A-S-H e gel C-A-S-H, originados pelo aumento de cálcio no precursor. O DRX mostrou aluminossilicatos hidratados, como a gismondina, nas amostras com maior proporção de vidro. Os resíduos de carvão e vidro demonstraram potencial para aplicações em produtos de até 20 MPa.

Palavras-chave: Geopolímeros, Aluminossilicatos, Vidro, Carvão mineral.

Synthesis of Geopolymers Using Industrial Waste

Abstract: Geopolymers are materials produced from aluminosilicate precursors activated in an alkaline medium through geopolymerization. In this study, the potential of coal waste and glass waste as precursors was evaluated. The activating solution contained sodium hydroxide (NaOH) at concentrations of 10 mol/L, 12 mol/L, and 14 mol/L, with alkaline sodium silicate (Na_2SiO_3) at a 1:2 ratio. The pastes were cured at 65 °C for 24 hours and then in a climatized chamber for 28 days. Compressive strength tests, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray diffraction (XRD) were performed. The mixture containing 25% coal waste and 75% glass achieved the highest compressive strength (23.34 MPa), with a liquid-to-solid ratio of 0.4 and 12 mol/L NaOH. SEM indicated the presence of N-A-S-H aluminosilicate gel and C-A-S-H gel, resulting from the increased calcium content in the precursor. XRD showed hydrated aluminosilicates, such as gismondine, in samples with a higher glass content. Coal and glass wastes demonstrated potential for applications in products with compressive strength of up to 20 MPa.

Keywords: Geopolymers, Aluminosilicates, Glass, Mineral coal.

Síntesis de Geopolímeros a Partir del Uso de Residuos Industriales

Resumen: Los geopolímeros son materiales producidos a partir de precursores aluminosilicatos activados en un medio alcalino mediante geopolimerización. En este estudio se evaluó el potencial de residuos de carbón mineral y de vidrio como precursores. La solución activadora contenía hidróxido de sodio (NaOH) en concentraciones de 10 mol/L, 12 mol/L y 14 mol/L, con silicato de sodio alcalino (Na_2SiO_3) en una proporción de 1:2. Las pastas se curaron a 65 °C durante 24 horas y posteriormente en una cámara climatizada durante 28 días. Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión, microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos X (DRX). La mezcla con 25 % de residuo de carbón y 75 % de vidrio obtuvo la mayor resistencia a la compresión (23,34 MPa), con una relación líquido/sólido de 0,4 y 12 mol/L de NaOH. La MEB indicó la presencia de gel aluminosilicato N-A-S-H y gel C-A-S-H, originados por el aumento de calcio en el precursor. La DRX mostró aluminosilicatos hidratados, como la gismondina, en las muestras con mayor proporción de vidrio. Los residuos de carbón y vidrio demostraron potencial para aplicaciones en productos de hasta 20 MPa de resistencia a la compresión.

Palabras clave: Geopolímeros, Aluminosilicatos, Vidrio, Carbón mineral.

INTRODUÇÃO

O concreto à base de cimento Portland comum é o recurso estrutural predominante na construção civil devido à sua versatilidade, baixo custo e elevada resistência (Khan, *et al.* 2022). Contudo, sua produção exige um consumo intensivo de energia e matérias-primas, resultando em impactos ambientais críticos, visto que a fabricação de cada tonelada de clínquer emite aproximadamente 0,8 toneladas de CO_2 (MESKHI *et al.*, 2023).

Essa pegada de carbono torna-se insustentável diante dos recordes históricos de concentração de CO_2 na atmosfera, que atingiram 421 ppm em 2022 – valor significativamente superior ao limite de 300 ppm ideal para o ar limpo (MESKHI *et al.*, 2023). Diante desse cenário de aquecimento global, torna-se urgente o desenvolvimento de alternativas tecnológicas mais limpas e ecologicamente corretas para substituir ou mitigar o uso do cimento Portland comum na indústria.

O conceito de desenvolvimento sustentável prevê a busca por alternativas ambientalmente amigáveis aos materiais e tecnologias tradicionais, que reduzam a quantidade de emissões de CO_2 na atmosfera, não poluam o meio ambiente e diminuam os custos energéticos e os custos dos processos produtivos. Entre essas tecnologias está a produção de concretos geopoliméricos (SHCHERBAN *et al.*, 2022).

O termo geopolímero é usado para descrever o produto da reação entre aluminossilicatos e uma solução de hidróxido e/ou silicato alcalino (DUXSON, *et al.*, 2007). Hafid, Hajjaji e Hafid, (2017) trataram como um polímero formado através da reação de policondensação de certos

resíduos contendo aluminossilicato, com álcalis, compostos por estruturas tridimensionais amorfas a semi-cristalinas de aluminossilicatos formadas pela combinação tetraédrica de SiO_4 e AlO_4 .

Entre as diversas matérias-primas utilizadas na produção de geopolímeros, o resíduo de vidro destaca-se como uma das fontes de resíduos mais abundantes e disponíveis. O resíduo de vidro é um subproduto da fabricação e do consumo de vidro (BESKOPYLNY *et al.*, 2022).

A produção de vidro plano atingiu a quantidade de 8,6 bilhões de unidades de vidro são produzidas no país anualmente, totalizando cerca de 1,3 milhão de toneladas de vidro colocado no mercado por ano. Infelizmente, em média, apenas 36% do vidro residual é reciclado para a produção de novos vidros no país, o que implica que cerca de 64% não é reciclado (ABIVIDRO, 2023).

Os resíduos de vidro apresentam elevado teor de aluminossilicatos, capazes de reagir facilmente com hidróxido de sódio (NaOH) ou silicato de sódio (Na_2SiO_3) para formar geopolímeros influenciando no desenvolvimento da resistência e da microestrutura de ligantes (MANIKANDAN E VASUGI, 2021).

Ainda entre as diversas matérias-primas utilizadas na produção de geopolímeros, os resíduos de carvão mineral também possuem potencial. Ocupam grandes áreas para deposição como também são prejudiciais ao solo e às águas subterrâneas por conta da lixiviação de materiais tóxicos existentes em sua composição, além de serem uma fonte de emissões de gases orgânicos voláteis (MISZ-KENNAN E FABIANSKA, 2011). Sendo assim, se tornaram uma preocupação ambiental primária em todo o mundo, especialmente para os países que usam carvão como sua principal fonte de energia (ZHANG E LING, 2020).

O rejeito de carvão é um resíduo sólido deixado no processo de mineração de carvão. É um subproduto problemático gerado a partir do processo de beneficiamento de carvão. Este material representa cerca de 10 a 15% em massa da produção de carvão. (LI *et al.*, 2016; HUANG *et al.*, 2017).

A região carbonífera do estado de Santa Catarina no Brasil é a que apresenta maiores transtornos relacionados aos rejeitos de carvão. Isto se deve às seguintes razões: mineração subterrânea mecanizada, grande volume de produção e características de suas jazidas, devido à presença do mineral pirita intercalado nas camadas de carvão. Além disso, as camadas de carvão são intercaladas no perfil litológico por folhelhos carbonosos e siltitos e tem em média entre 50 e 65% de cinzas, o que acarreta em um carvão de baixo poder calorífico (AMARAL FILHO, 2014).

A gravidade da situação e área de abrangência levaram a região carbonífera do sul de Santa Catarina a ser enquadrada pelo Decreto Federal 86.206 de 1980 como a 14ª Área Crítica para efeito do “Plano Nacional para Controle da Poluição Ambiental”. O Governo Federal, o Governo Estadual e 22 empresas mineradoras de carvão de Santa Catarina foram condenados em sentença da Justiça Federal, em janeiro de 2000, a promover toda a recuperação ambiental da região afetada pela mineração (AMARAL FILHO, 2014).

Desde então, as empresas carboníferas do estado, juntamente com o poder público, vêm apoiando e investindo em pesquisas que reduzam a quantidade de resíduos gerados e dar um novo destino aos que estão dispostos (AMARAL FILHO, 2014).

Apesar da indústria da construção ainda apresentar uma perspectiva muito conservadora para a efetividade de novas tecnologias e produtos como possíveis soluções, os geopolímeros aparecem como futuros materiais a serem otimizados e desenvolvidos para aplicações em diferentes áreas.

MATERIAL E MÉTODOS

Materiais precursores e reagentes

Resíduo de carvão: Material coletado em vinte locais distintos a 50cm da superfície na região carbonífera de Criciúma, em Santa Catarina. Após a coleta, os resíduos de carvão foram secos em estufa à temperatura de 100°C por 24 horas, misturadas e quarteadas seguindo o estabelecido na NBR 10007 (ABNT, 2004) e posteriormente submetidas às operações de caracterização.

O beneficiamento do rejeito de carvão consistiu no processo de cominuição iniciado pelo triturador de mandíbulas, modelo BMI 975C, marca IMIC. Após o triturador de mandíbulas o material foi conduzido para o moinho de discos, modelo VM3, marca Powtec. Essa etapa foi realizada em lotes de aproximadamente 300 gramas de material de cada vez, devido ao limite do funil de carregamento, limitando o tamanho nos grãos em passantes na peneira 0,6mm. A fim de reduzir a granulometria, o resíduo de carvão passou pelo moinho de panelas, modelo AMPI-M, marca Amef, por 60 segundos.

Resíduo de vidro: O resíduo de vidro foi obtido pelo corte e lapidação de vidro plano de uma vidraçaria de médio porte localizada em Curitiba no Paraná, Brasil. Após a coleta, os resíduos de vidro foram secos em estufa à temperatura de 100°C por 24 horas, misturadas e quarteadas seguindo o estabelecido na NBR 10007 (ABNT, 2004). Para a redução das partículas

grosseiras do resíduo de vidro utilizou-se almofariz de porcelana e pistilho, seguido do moinho de panelas, cujo tempo de moagem foi fixado em 60s.

Hidróxido de sódio (NaOH): O hidróxido de sódio utilizado foi em pérolas PA, Cloroquímica com pureza de 97%.

Silicato de sódio alcalino (Na_2SiO_3): Foi utilizado da marca Cloroquímica.

Método

Para a produção dos geopolímeros foram confeccionados 4 traços distintos denominados A, B, C e D, cuja composição foi a seguinte: A (75%RC+25%RV), B (50%RC+50%RV), C (25%RC+75%RV), D (0%RC+100%RV), sendo RC resíduo de carvão e RV, resíduo de vidro. A composição dos traços pode ser verificada na Tabela 1. Cada traço foi testado com 3 concentrações (10; 12; e 14mol/L) e 3 relações líquido/sólido (0,4; 0,6 e 0,8), os quais foram definidos com base na metodologia de Cheng *et al.* (2018).

Tabela 1. Composição dos traços produzidos

Nome	RV (g)	RC (g)	Soma (g)	Mol/L	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)	L/S
A-10-04	112,5	337,50	450	10	60	120	0,4
A-10-06	75	225,00	300	10	60	120	0,6
A-10-08	56,25	168,75	225	10	60	120	0,8
B-10-04	225	225,00	450	10	60	120	0,4
B-10-06	150	150,00	300	10	60	120	0,6
B-10-08	112,5	112,50	225	10	60	120	0,8
C-10-04	337,5	112,50	450	10	60	120	0,4
C-10-06	225	75,00	300	10	60	120	0,6
C-10-08	168,75	56,25	225	10	60	120	0,8
D-10-04	450	0,00	450	10	60	120	0,4
D-10-06	300	0,00	300	10	60	120	0,6
D-10-08	225	0,00	225	10	60	120	0,8
A-12-04	112,5	337,50	450	12	60	120	0,4
A-12-06	75	225,00	300	12	60	120	0,6
A-12-08	56,25	168,75	225	12	60	120	0,8
B-12-04	225	225,00	450	12	60	120	0,4
B-12-06	150	150,00	300	12	60	120	0,6
B-12-08	112,5	112,50	225	12	60	120	0,8
C-12-04	337,5	112,50	450	12	60	120	0,4
C-12-06	225	75,00	300	12	60	120	0,6
C-12-08	168,75	56,25	225	12	60	120	0,8
D-12-04	450	0,00	450	12	60	120	0,4
D-12-06	300	0,00	300	12	60	120	0,6
D-12-08	225	0,00	225	12	60	120	0,8
A-14-04	112,5	337,50	450	14	60	120	0,4
A-14-06	75	225,00	300	14	60	120	0,6
A-14-08	56,25	168,75	225	14	60	120	0,8
B-14-04	225	225,00	450	14	60	120	0,4
B-14-06	150	150,00	300	14	60	120	0,6
B-14-08	112,5	112,50	225	14	60	120	0,8
C-14-04	337,5	112,50	450	14	60	120	0,4
C-14-06	225	75,00	300	14	60	120	0,6
C-14-08	168,75	56,25	225	14	60	120	0,8
D-14-04	450	0,00	450	14	60	120	0,4
D-14-06	300	0,00	300	14	60	120	0,6
D-14-08	225	0,00	225	14	60	120	0,8

Fonte: Autores, 2021.

A solução ativadora foi desenvolvida fixando uma relação Na₂SiO₃/NaOH igual a 2 (1:2) com base na metodologia de Yahya *et al.* (2015).

O primeiro processo envolvido para a preparação da solução ativadora é a mistura do hidróxido com a água em concentração de 10, 12 e 14 mol/L. Devido a reação exotérmica que ocorre no momento da dissolução do hidróxido com a água, as soluções foram mantidas em repouso por 24 horas. O segundo processo para preparo da solução ativadora envolve a mistura da solução de hidróxido de sódio com o silicato de sódio. Após a mistura os recipientes com as soluções foram vedados e mantidos em repouso por 24 horas em temperatura controlada (23°C ± 2) antes da sintetização dos geopolímeros.

Após 24 horas de repouso das soluções ativadoras, os materiais precursores foram pesados e depositados no recipiente do agitador, em seguida foi adicionado à solução ativadora e agitado por cerca de 5 minutos até a total homogeneização. A frequência de agitação nesta etapa foi de 60Hz, conforme metodologia de Alvarenga (2018).

Após a mistura, foram moldados quatro corpos de prova cúbico nas dimensões 40x40x40mm (LONGUI, 2015; CHENG *et al.*, 2018) para cada amostra, cujas dimensões também são citadas na NBR 13279 (ABNT, 2005). O processo de adensamento foi realizado manualmente com preenchimento do corpo de prova em duas camadas e aplicação de 25 golpes com soquete metálico em cada camada. Os corpos de prova foram submetidos a cura térmica, através de uma estufa em temperatura de 65°C por 24 horas, após, foram desmoldados e mantidos em câmara climatizada com uma umidade de 95±2%, temperatura de 23±2°C até a data de ruptura.

As amostras foram caracterizadas por meio da compressão uniaxial como descrito na NBR 13279 (ABNT, 2005). O equipamento utilizado foi uma prensa EMIC DL 20000, com uma célula de carga acoplada de 200kN com precisão de 1N, e com um deslocamento de 0,5mm/min.

A caracterização das fases cristalinas das pastas geopoliméricas foi realizada com material em formato de pó, passante na peneira #200. A moagem tanto dos precursores como dos geopolímeros foi realizada em cadinho e almofariz de porcelana. O ensaio de DRX foi realizado no equipamento Shimadzu, modelo XRD-7000, passo 0,02°, velocidade de 1°/min, 2 θ (3° a 118°). Para a análise das fases cristalinas foi utilizado o software X'Pert High Score Plus.

Os dados experimentais foram avaliados estatisticamente por meio de análise de variância (ANOVA), considerando os fatores relação líquido/sólido e concentração molar, bem como sua interação, adotando-se nível de significância de 5% ($P < 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resistência à Compressão

Na Figura 1 são apresentados os resultados de resistência à compressão dos traços A (75%RC+25%RV), B (50%RC+50%RV), C (25%RC+75%RV), D (0%RC+100%RV), nos quais foi avaliada a influência da variável concentração molar e da relação líquido/sólido nos geopolímeros com idade de 28 dias.

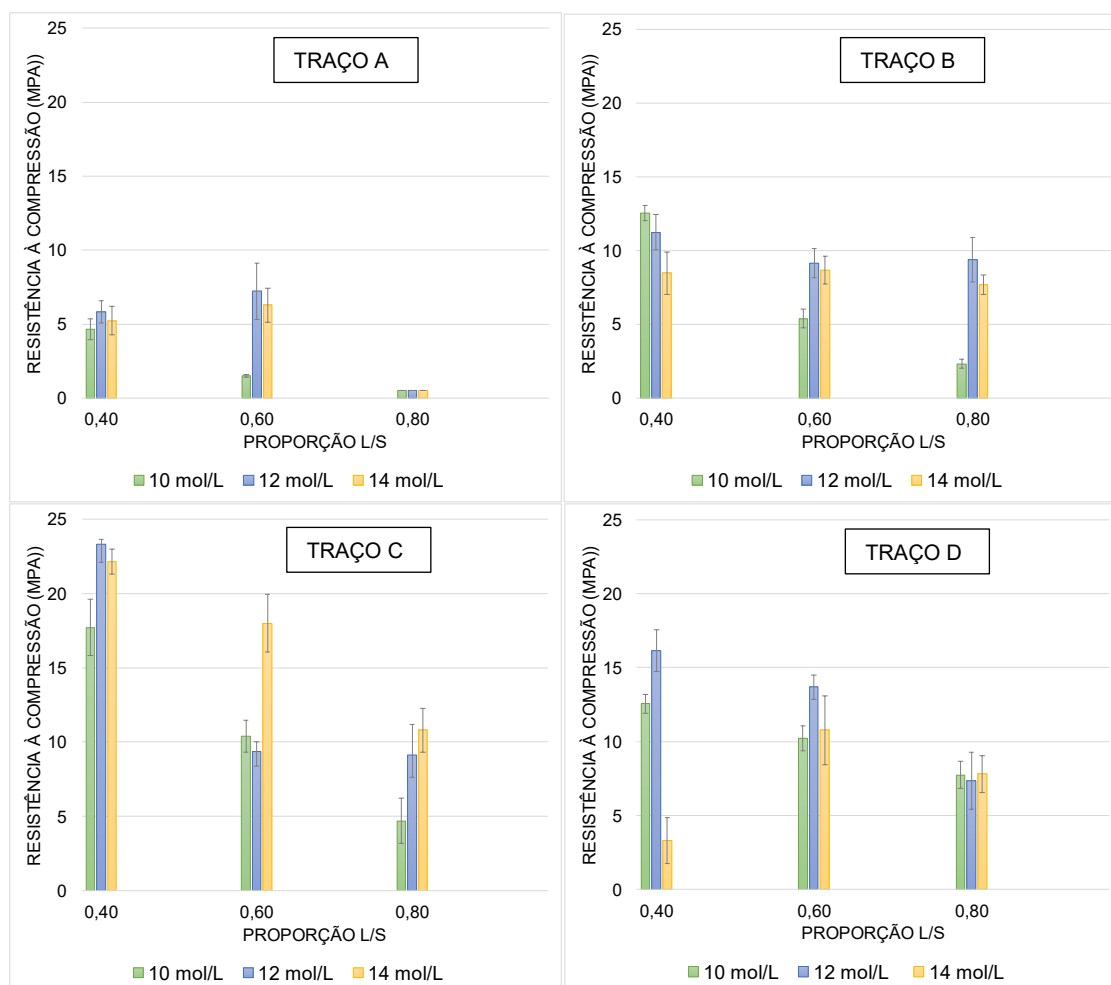


Figura 1. Resistência à compressão dos traços produzidos

Fonte: Autores, 2021.

Para o traço A, a análise de variância indicou diferenças significativas entre os valores médios de resistência à compressão para os fatores relação líquido/sólido e concentração molar, bem como a interação entre eles, em composições com 75% de RC e 25% de RV. Observou-se que os fatores empregados influenciaram na resistência à compressão, sendo $P < 0,05$ significativo.

Os resultados indicaram que, para 10M, as resistências médias foram 4,65 MPa, 1,48 MPa e 0,5 MPa para as relações 0,4, 0,6 e 0,8, respectivamente. Com 12 mol/L, as resistências melhoraram para 7,22 MPa e 5,84 MPa nas relações 0,6 e 0,4, enquanto para 14 mol/L os valores foram 6,28 MPa e 5,22 MPa, seguindo tendência semelhante. Apesar do aumento da concentração de NaOH, houve decréscimo da resistência de 10% e 13% para as relações 0,4 e 0,6 ao passar de 12 mol/L para 14 mol/L, o que indica que a maior lixiviação de sílica não resultou em melhores propriedades mecânicas.

Na relação 0,8, todas as concentrações molares apresentaram resistência de 0,5 MPa, possivelmente devido ao aumento de água disponível no sistema, que gerou maior número de

vazios e, conseqüentemente, maior porosidade (HARDJITO E RANGAN, 2005; GARCIA-LODEIRO, PALOMO E FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). A maior relação líquido/sólido influencia não só a cinética da reação, mas também o desenvolvimento da microestrutura. Como o traço A possui 75% de RC, o calor durante a cura favoreceu a formação de grandes vazios pela rápida evaporação da água, conforme também constatado por Koshi *et al.* (2019). Portanto, o desempenho insatisfatório nestas composições se deu, principalmente, pela baixa reatividade do material precursor predominante nas misturas.

No traço B, a análise de variância apontou diferenças significativas entre as médias de resistência à compressão para os fatores e suas interações em composições com 50% de RC e 50% de RV. Os fatores também influenciaram significativamente na resistência, com $P < 0,05$.

Os resultados mostraram que, para 12 mol/L, as resistências foram de 9,40 MPa e 9,15 MPa nas relações 0,8 e 0,6, respectivamente, enquanto para 10 mol/L e relação 0,4, a resistência atingiu 12,56 MPa, o melhor desempenho do traço B. Comparando com o traço A, as resistências foram superiores em 51%, 35% e 92% nas relações 0,4, 0,6 e 0,8, respectivamente, resultado do acréscimo de RV no sistema, que proporcionou maior quantidade de sílica amorfa e cálcio, além da redução do RC, material com poucas características amorfas. Esse maior teor de cálcio aumenta o número de ligações Ca-O envolvidas na geopolimerização, indicando formação de géis C-A-S-H, corroborando Zhao *et al.* (2024), que apontam o impacto significativo do cálcio ativo na polimerização.

Para o traço C, com 25% de RC e 75% de RV, a análise de variância também apontou diferenças significativas para os fatores e suas interações, com $P < 0,05$. Observou-se que houve redução da resistência à compressão com o aumento da relação líquido/sólido para todas as concentrações molares, sendo os valores para a relação 0,4 maiores em 40% e 61% em relação a 0,6 e 0,8, respectivamente. Esse comportamento está de acordo com Cheng *et al.* (2018), que observaram maior densidade e menor porosidade para menores relações líquido/sólido. Nas amostras com relação 0,8, notou-se tendência de melhora da resistência com o aumento da molaridade, especialmente para 14 mol/L, com incrementos de 57% e 16% em relação a 10 e 12 mol/L, respectivamente. No entanto, essas amostras apresentaram aspecto úmido, indicando que ainda não estavam totalmente curadas.

A amostra C-12-04 destacou-se ao atingir 23,34 MPa, o maior valor entre todas as formulações, associado à formação mais intensa de géis de reação, matriz mais densa e homogênea, e menor presença de picos cristalinos, como identificado nas análises de MEV e DRX.



No traço D, composto por 100% de RV, a análise de variância também indicou diferenças significativas para os fatores e suas interações, com $P < 0,05$. A melhor resistência à compressão foi observada na amostra D-12-04, com 16,14 MPa, porém ainda 31% menor em relação à amostra C-12-04, destacando a importância da presença de alumínio no processo de geopolimerização para o desenvolvimento da resistência (ZHANG *et al.*, 2026). Para a relação líquido/sólido 0,6, houve decréscimos de 25% e 21% para 10 e 14 mol/L respectivamente. Na relação 0,8, os valores de resistência para 10, 12 e 14 mol/L não diferiram estatisticamente segundo o teste de Tukey, indicando que todas as amostras foram prejudicadas pela ausência de alumínio no precursor.

Difração de Raios-X (DRX)

Na Figura 2 é apresentado o difratograma das melhores composições (A-12-06; B-10-04; C-12-04 e D-12-04) dos geopolímeros produzidos.

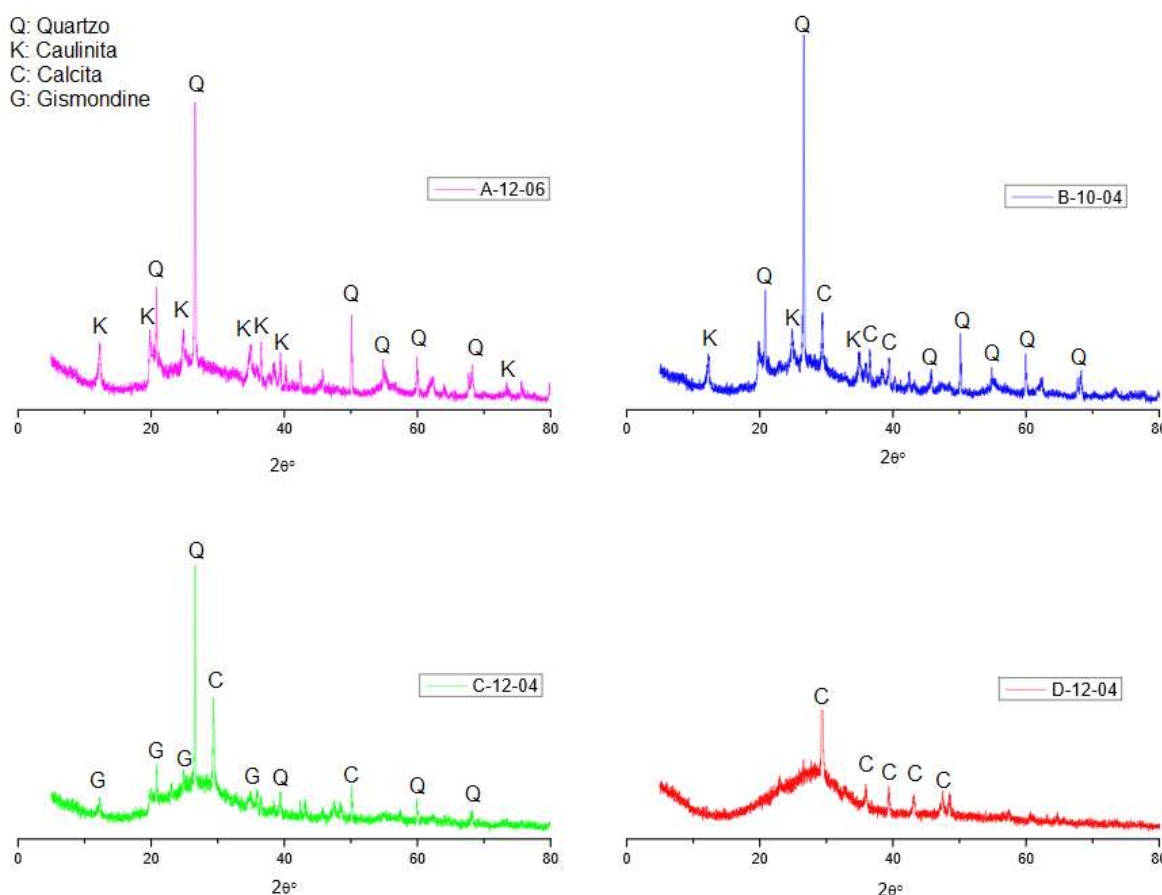


Figura 2. Difratograma dos geopolímeros produzidos

Fonte: Autora 2021.

Como pode ser observado na Figura 2, os principais minerais constituintes das pastas geopoliméricas incluem o quartzo - Q (SiO_2), a caulinita - K ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e a calcita - C (CaCO_3).

Os picos característicos dos geopolímeros A-12-06 e B-10-04 principalmente, permanecem no mesmo padrão do material precursor (RC) independentemente de polimerização geológica, indicando que possivelmente algumas fases cristalinas do resíduo de carvão atuam como preenchedores internos e não participam da polimerização geológica, originando partículas soltas não reagidas, o que também pôde ser observado nas imagens de MEV.

De acordo com os padrões de DRX da literatura, para as amostras A-12-06 e B-10-4 a faixa 2θ entre 17° e 32° indica que os produtos formados estão em um estado intermediário entre os estados amorfo e o semicristalino. O pico de quartzo é o principal pico das pastas geopoliméricas, o qual diminuiu a medida que há aumento da molaridade de 10 mol/L para 12 mol/L.

Os picos provenientes do mineral calcita estão mais evidentes nos geopolímeros com maior proporção do resíduo de vidro, visto que, o cálcio está presente no precursor.

Para C-12-04 é possível identificar um pequeno halo amorfo ou semi-cristalino entre 22° e 32° que está relacionado com o maior ganho de resistência e menor quantidade de partículas não reagidas na superfície dos geopolímeros. Este halo é observado em materiais amorfos e polímeros inorgânicos, devido a presença de silicatos na composição do material.

As reduções dos picos cristalinos estão relacionadas ao aumento do conteúdo amorfo, o que sugere a geopolimerização. Para C-12-04 foi identificado picos da gismondina - G ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), o qual caracteriza-se por um zeólito ou aluminossilicato hidratado proveniente da geopolimerização.

Para D-12-04 o halo amorfo oriundo do RV manteve-se indicando a presença do mineral calcita, no qual, sozinho, produziu uma matriz fraca e pouco ligada quimicamente, devido a falta de Al no precursor.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Com a caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV), objetivou-se observar a uniformidade do sistema (partículas que não reagiram), trincas, porosidade e a formação cristais (identificados pela técnica de DRX). As melhores composições de cada traço foram avaliadas por microscopia, utilizando-se magnificações de 500X e 2000X nas composições geopoliméricas selecionadas. Na Figura 3 estão apresentadas as imagens da microscopia da composição A-12-06.

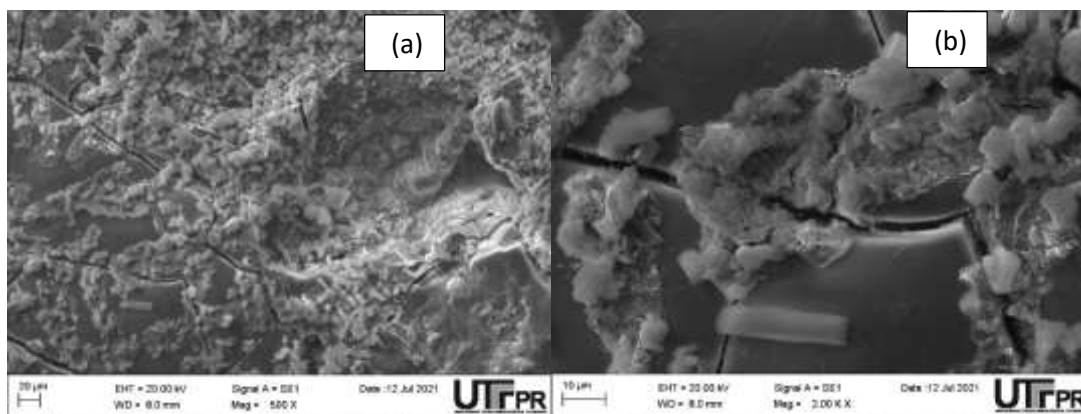


Figura 3. Microscopia da composição A-12-06
Legenda: a - Magnificação 500X; b - Magnificação 2000X.
Fonte: Autores, 2021.

Apesar da pasta ter apresentado uma boa densificação, e uma aparência relativamente homogênea, pode-se observar que muitas partículas de RC não reagiram. As partículas não reagidas, com formatos irregulares geraram aglomerados que acabaram levando a um aumento de porosidade, interferindo na intensidade de polimerização.

As trincas visualizadas devem-se ao ensaio mecânico pois a amostra sofreu um esforço mecânico de compressão antes de ser analisada por MEV ou ainda pela desidratação da amostra, visto que, utilizou-se da cura em alta temperatura. Apesar da temperatura acelerar o processo de geopolimerização, houve evaporação rápida da água. A água presente na reação é proveniente dos ativadores alcalinos (silicato de sódio + solução de hidróxido de sódio).

Não é possível identificar partículas oriundas do resíduo de vidro. As partículas “soltas” encontradas se assemelham a bibliografia de geopolímeros com resíduo de carvão (Cheng, 2018; Ma, *et al.*, 2020). Além de que, o traço A apresenta 75% de resíduo de carvão em sua composição.

Na Figura 4 estão apresentadas as imagens da microscopia da composição B-10-04.

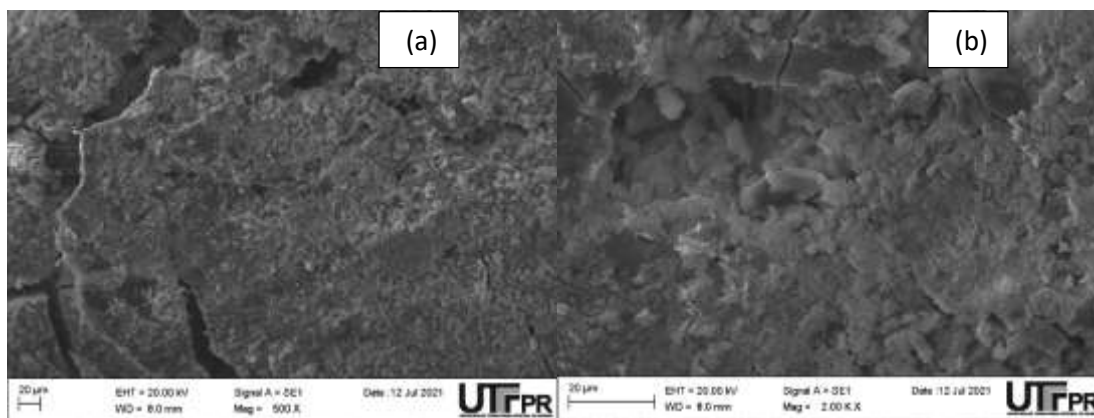


Figura 4. Microscopia da composição B-10-04
Legenda: a - Magnificação 500X; b - Magnificação 2000X.
Fonte: Autores, 2021.

A estrutura desta composição se mostrou mais densa se comparada a anterior. Ainda que as imagens apresentam “partículas soltas”, estas são em menor quantidade se comparadas a composição anterior, indicando em ambos os casos que a dissolução completa não foi alcançada. Além disso, a aparência de homogeneidade reflete no maior valor de resistência à compressão se comparada a A-12-06.

Nesta composição, observou-se também poros e trincas oriundos do ensaio de resistência mecânica ou da rápida evaporação da água. Porém, os vazios apresentados tem menor dimensão e são em menores quantidades, conforme análise visual através da microscopia. Ainda assim, nota-se a que a superfície tem um aspecto rugoso e poros entre as partículas soltas na matriz, o que representa cura incompleta do material.

Na Figura 5 estão apresentadas as imagens da microscopia da composição C-12-04.

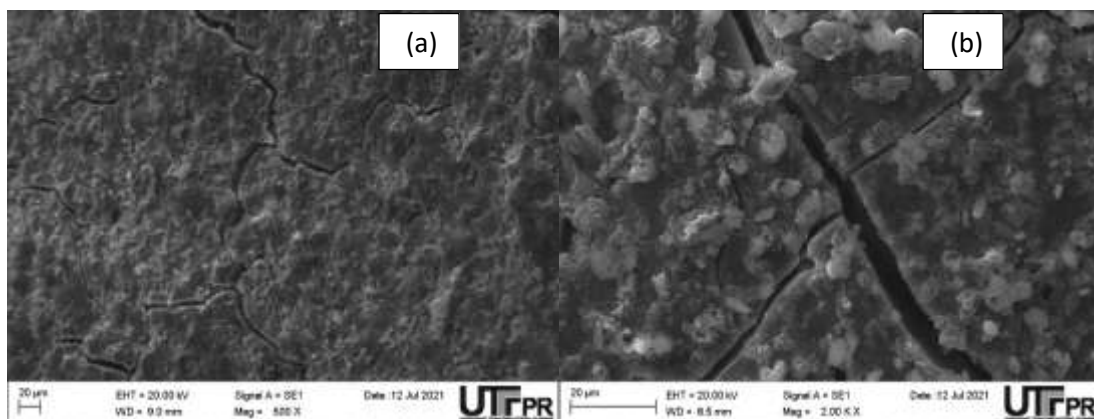


Figura 5. Microscopia da composição C-12-04
Legenda: a - Magnificação 500X; b - Magnificação 2000X.
Fonte: Autores, 2021.

A Figura 6 apresenta as imagens de MEV do melhor traço em relação a resistência à compressão (23,34MPa). Quanto maior o teor de resíduo de vidro, mais compacto é a estrutura do geopolímero, sendo assim, maior grau de polimerização, refletindo na resistência.

Associado à análise de MEV, foi realizada a análise química pontual por EDS da pasta geopolimérica, como apresentado na Figura 7. Nessas figuras, estão demarcadas as regiões utilizadas para a análise pontual por EDS.

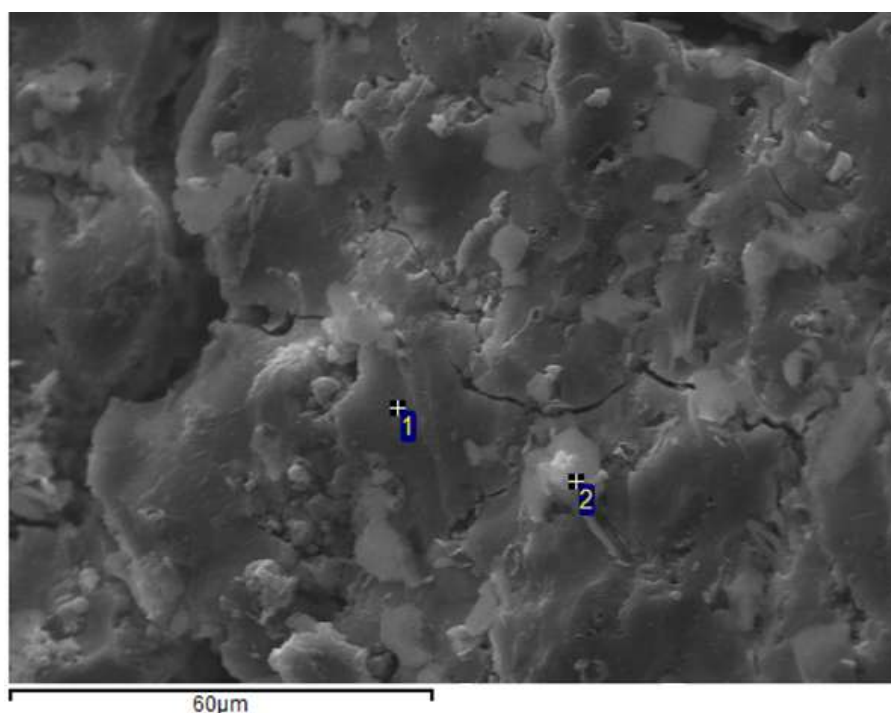


Figura 6. Análise pontual da pasta geopolimérica C-12-04

Fonte: Autores, 2021.

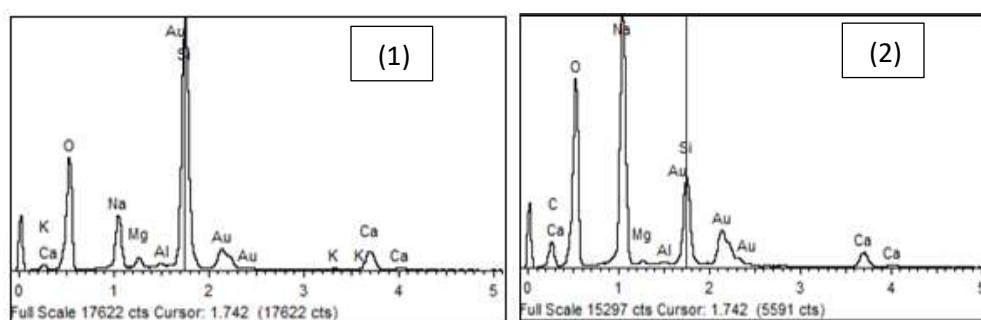


Figura 7. Análise semi-quantitativa (%) da pasta geopolimérica C-12-04

Fonte: Autores, 2021.

Apesar dos picos de Si, Al e Ca estarem presentes na amostra com pouca intensidade pode-se afirmar que houve a formação de um gel geopolimérico constituído principalmente, por Na, Al e Si (N-A-S-H), este em maior quantidade devido a presença de Na, e o gel (C-A-S-H) constituído por Ca, Al e Si. Os componentes do resíduo de carvão incluem principalmente SiO_2 e

Al_2O_3 , enquanto os produtos se referem principalmente a géis N-A-S-H. Devido a mistura com o resíduo de vidro, os principais produtos de reação mudam de géis N-A-S-H para géis C-A-S-H, isto se deve ao aumento do teor de Ca.

Na Figura 8 estão apresentadas as imagens da microscopia da composição D-12-04.

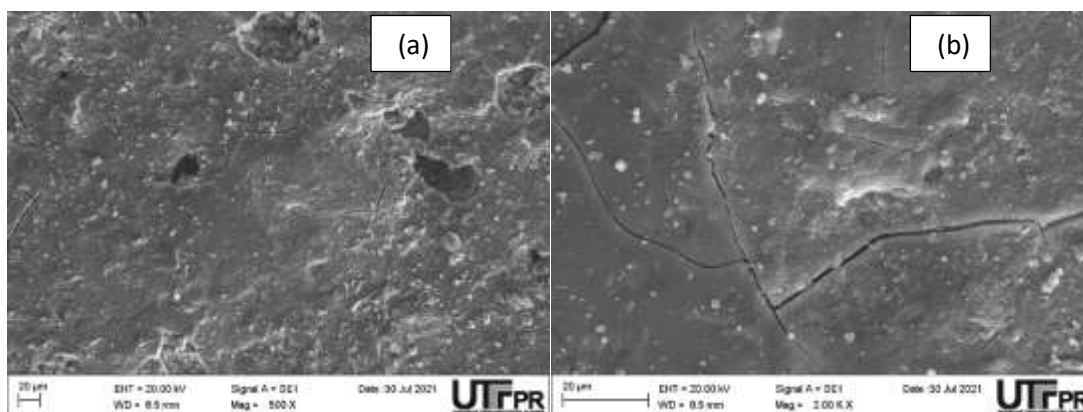


Figura 8. Microscopia da composição D-12-04

Legenda: a – Magnificação 500X; b – Magnificação 2000X.

Fonte: Autores, 2021.

As imagens apresentam uma matriz densificada, com aspecto mais compacto e as partículas menores que as amostras anteriores, característicos deste tipo de material, semelhante as apresentadas por Fagundes (2019) e em concordância com MESKHI *et al.*, (2023) onde afirma que uma estrutura mais coesa e um empacotamento mais compacto das partículas, resulta em uma interação mais eficiente entre os componentes no interior do concreto geopolimérico. Ao longo dos processos físicos e químicos de endurecimento, observa-se um maior grau de desenvolvimento estrutural, bem como uma redução na quantidade de microporos e vazios, favorecendo um empacotamento mais homogêneo e denso das partículas.

Não houve aparecimento de partículas não reagidas, devido a ausência do resíduo de carvão. Poros e trincas continuaram aparecendo, porém em menor dimensão e quantidade que A-12-06, conforme análise visual através da microscopia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da caracterização dos resíduos de carvão e vidro e posteriormente sintetização de amostras de geopolímeros, foi concluído que tais resíduos tem potencial para serem utilizados para a produção de materiais geopoliméricos.

Para o resíduo de carvão, por meio da análise de DRX foi identificado o quartzo como fase cristalina majoritária, além da presença de outros argilominerais como a caulinita e a muscovita, o que pode ter prejudicado o desempenho dos geopolímeros que continham este resíduo em sua maior proporção (75% e 50%). Não foi identificado o mineral pirita nas amostras do resíduo, devido ao grande tempo de exposição ao meio que o material estava sujeito.

O resíduo de vidro possui 78% de sílica, e não possui teor de alumínio, necessário para a álcali-ativação. Por outro lado, também é formado de 16,37% de cálcio, responsável pela melhora na transformação das fases dos geopolímeros produzidos.

Na análise microestrutural das pastas foi identificado por meio de DRX a formação de halo amorfo ou semicristalino entre os valores de $17-35^\circ$ (valores de 2θ), indicando que os produtos formados estão em um estado intermediário entre os estados amorfo e o semicristalino. Os geopolímeros do traços A (75%RC-25%RV) e B (50%RC-50%RV) apresentaram muitas partículas soltas que não reagiram no momento da geopolimerização, originando uma matriz fraca e pouco ligada, ocasionado pela baixa reatividade do material precursor preponderante nas misturas.

Segundo a análise através da ANOVA, as variáveis (molaridade e relação l/s) influenciaram nas médias das resistências em todos os traços produzidos. Os geopolímeros do traços A (75%RC-25%RV) e B (50%RC-50%RV) não seguiram uma tendência de aumento de resistência a medida que as molaridades aumentaram. Por outro lado, as resistências obtiveram ganhos com o aumento da relação líquido/sólido, tendo em vista que, com o aumento da relação l/s tem-se uma maior quantidade de água (misturada ao hidróxido) disponível no sistema, que pode ter gerado um maior número de vazios, afetando a porosidade e conseqüentemente a resistência.

A redução dos picos cristalinos e o acréscimo de resistência ocorreu com a inclusão do resíduo de vidro na proporção de 75% no sistema geopolimérico. A amostra com concentração de 12M e relação líquido/sólido 0,4 atingiu 23,34MPa, aos 28 dias, melhor desempenho entre todas os geopolímeros produzidos. Este resultado, está relacionado com as análises de MEV que indicaram a formação dos géis de reação e uma matriz mais homogênea que as demais amostras. Para esta amostra, foi confirmada a presença do zeólito ou aluminossilicato hidratado, caracterizado como gismondina.

A análise das amostras contendo somente resíduo de vidro mostraram que o resíduo de vidro sozinho não é suficiente para a álcali-ativação demonstrando que o alumínio ocupa um papel de grande importância na matriz geopolimérica. O alumínio é o responsável por

proporcionar a formação do gel I (rico em Al) e garantir a resistência nas primeiras idades. Apesar do resíduo de carvão conter alumínio em sua composição, foi insuficiente para promover a geopolimerização das amostras devido a grande quantidade de partículas de carvão que não reagiram na superfície dos grãos.

Portanto, objetivando produzir geopolímeros a partir da reutilização de materiais facilmente encontrados que não contenham valor agregado, os resultados foram viáveis para aplicações em produtos de até 20MPa, como contrapisos, calçadas, blocos de concreto, fundações, entre outros. Materiais comerciais no mercado como metacaulim, cinzas volantes e escórias que já foram avaliadas e testadas como precursores para sistemas geopolímeros por outros autores e tiveram resultados positivos, poderiam ser adicionados nas matrizes geopoliméricas para melhora do desempenho e maior formação de géis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABRAVIDRO. Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos. Disponível em [Vidro Certo - Abividro](#). Acesso em 23/12/2025.

ALMEIDA, T. M. **Uso potencial de resíduos da indústria do alumínio na produção de geopolímeros**. 2018. 73f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Estado de São Paulo. Diadema, 2018.

AMARAL FILHO, J. R. **Aproveitamento de rejeitos de carvão em Santa Catarina, Brasil**. 2014. 161 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

BERNAL, S. A.; et al. Performance at high temperature of alkali-activated slag pastes produced with silica fume and rice husk ash based activators. **Materiales de construcción**, v. 65, n. 318, p. 1-10, 2015.

Beskopylny, A.N.; Stel'makh, S.A.; Shcherban', E.M.; Mailyan, L.R.; Meskhi, B.; Beskopylny, N.; El'shaeva, D.; Kotenko, M. The Investigation of Compacting Cement Systems for Studying the Fundamental Process of Cement Gel Formation. *Gels* 2022, 8, 530.

CHENG, Y.; et al. Preparation and characterization of coal gangue geopolymers. **Construction and Building Materials** 187 (2018) 318–326.

DUXSON, P. et al. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 292, n. 1, p. 8–20, 2007.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator. *Cement And Concrete Research*, Madrid, p.1204–1209, 2005.

HAFID, K.; HAJAJI, M.; HAFID, H. Influence of NaOH concentration on microstructure and properties of cured alkali-activated calcined clay **Journal of Building Engineering** (2017) 11: 158-165

HARDJITO, B.; RANGAN, B. V. Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. Research Report GCI. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology. Perth, Australia, p. 103. 2005.



HUANG, Y.; et al. Microstructure of coal gangue and precipitation of heavy metal elements. *Journal of Spectroscopy* 2017 (2017).

Khan, K.; Ahmad, W.; Amin, M.N.; Nazar, S. A Scientometric–Analysis–Based Review of the Research Development on Geopolymers. *Polymers* 2022, 14, 3676.

KOSHY, N.; DONDROB, K.; HU, L.; WEN, Q.; MEEGODA, J. N. Synthesis and characterization of geopolymers derived from coal gangue, fly ash and red mud. ***Construction and Building Materials*** 206 (2019) 287–296.

LI, L.; et al The thermal activation process of coal gangue selected from Zhungeer in China. ***Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*** 126 (2016) 1559–1566.

LONGHI, M. A. **Álcali-ativação do lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo**. 2015. 184 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

Manikandan, P.; Vasugi, V. A Critical Review of Waste Glass Powder as an Aluminosilicate Source Material for Sustainable Geopolymer Concrete Production. *Silicon* 2021, 13, 3649–3663.

MISZ-KENNAN, M.; FABIAŃSKA, M. J. Application of organic petrology and geochemistry to coal waste studies. ***International Journal of Coal Geology*** 88 (2011) 1–23.

MOGHADAM M. J.; AJALLOEIAN, R.; HAJIANNIA, A. Preparation and application of álcali-activated materials based on waste glass and coal gangue: A review. ***Construction and Building Materials*** 221 (2019) 84–98.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. ***Annual Review of Materials Research***, v. 44, n. 1, p. 299–327, 2014.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. Alkali activated materials: State-of-the-Art Report. 1. ed. Austrália: Springer, 2014.

Shcherban, E.M.; Stel'makh, S.A.; Beskopylny, A.; Mailyan, L.R.; Meskhi, B.; Shuyskiy, A.; Beskopylny, N.; Dotsenko, N. Mathematical Modeling and Experimental Substantiation of the Gas Release Process in the Production of Non-Autoclaved Aerated Concrete. ***Materials*** 2022, 15, 2642.

YAHYA, Z.; ABDULLAH, Mohd M. A. B.; HUSSIN, K.; ISMAIL, K. N.; RAZAK, R. A.; SANDU, A. V. Effect of solids-to-liquids, Na_2SiO_3 -to- NaOH and curing temperature on the palm oil boiler ash (Si + Ca) geopolymerisation system. ***Materials***, Basel, v. 8, n. 5, p. 2227–2242, 2015.

ZHANG, Y.; LING, T. C. Reactivity activation of waste coal gangue and its impact on the properties of cement-based materials – A review. ***Construction and Building Materials*** 234 (2020).

Zhang, H., et al. Advancements in Al-rich precursors for high-performance geopolymer binders. [Journal of Cleaner Production / IOP Science, 2026.

Zhao, Y., et al. *The Influence of Particle Size and Calcium Content on Performance Characteristics of Geopolymer Gels*, 2024.

