



Influência da vibração e pressão sobre argamassas geopoliméricas com adição de resíduo da mineração.

Hellen Késia Santos de Souza, Jennifer Martins de Souza, Caroline Aparecida Sousa Soares

hellenkesia9@gmail.com

jennilopezmsouza@gmail.com

carolinesooares16@gmail.com

Professora orientadora: Vanessa Mota Vieira

Resumo

Os geopolímeros vem se apresentando como uma alternativa promissora para a substituição do cimento portland, isso ocorre devido a baixa emissão de CO₂ na sua matriz produtiva, além de apresentar alta resistência mecânica, durabilidade e desempenho térmico. Apesar das vantagens, os geopolímeros enfrentam desafios em termos de normas padronizadas, custos de produção e aceitação comercial. O trabalho tem como objetivo principal avaliar a influência da vibração e pressão sobre as argamassas geopoliméricas, observando os efeitos causados na absorção e compressão. No presente trabalho foram feitos ensaios de absorção e compressão seguindo as seguintes normas NBR 9778 e a NBR 9778, através dos resultados obtidos foi realizada uma comparação com os dados disponibilizados na literatura atual. Realizou-se também a caracterização dos materiais utilizados na produção dos corpos de provas através da difração de raio-x e a fluorescência de raio-x, com o intuito de identificar e quantificar os compostos presentes em cada material. Conclui-se que a aplicação da pressão e vibração aumenta a absorção de água e a resistência à compressão.

Palavras-chaves: Geopolímeros, Sustentabilidade, Cimento Portland, Ativação alcalina.

1. INTRODUÇÃO

Os geopolímeros são materiais obtidos por meio da ativação alcalina, eles são polímeros inorgânicos que apresentam vantagens em relação ao seu custo de produção, resistência, durabilidade e redução dos impactos ambientais (MURILLO *et al.*, 2017 apud FERREIRA *et al.*, 2020).

O termo geopolímero foi inserido por Davidovits na década de 1970, ele buscava naquela época obter um material sílico-aluminoso que fosse ativado alcalinamente (SEVERO ET AL, 2013 apud SILVA, 2019), permitindo sua utilização em diversas aplicações, que deveriam atender a alguns critérios como: contenção de resíduos radioativo e tóxico, em cimento e concreto e compósitos para reparos infraestruturais entre outros (DAVIDOVITS, 2013 apud SILVA, 2019). Os geopolímeros são obtidos através de um precursor é uma solução alcalina denominada como ativador, é utilizado como precursor um aluminossilicato e como ativador uma solução de hidróxido e silicato (SILVA, 2019).

Atualmente na indústria cimenteira tem como principal produto o cimento Portland, que se caracteriza por ser um pó fino que apresenta propriedade aglomerantes, ligantes ou aglutinantes que em contato com a água endurece. Durante o processo produtivo do cimento Portland ocorre a emissão de dióxido de carbono, que são

provenientes da produção de clínquer de cimento essa emissão ocorre por meio da descarbonização do calcário. Para diminuir os impactos ambientais causados pela produção do cimento Portland, busca-se encontrar ligantes alternativos, dentre eles os geopolímeros apresentam-se como promissores devido a sua baixa emissão de CO₂. Diferente do cimento Portland, os geopolímeros são obtidos pela fusão do calcário e argila, eles são formados através da reação química e temperatura frequentes de resíduos e material virgem que contenham quantidades suficientes de componentes reativos de alumina e sílica. Estes materiais trazem benefícios para o meio ambiente e precisam apenas de uma pequena quantidade de energia para serem produzidos, eles também podem ser produzidos através de subprodutos disponibilizados pela indústria (DIAS, 2012).

Poucas vezes as reações de geopolimerização são completas durante o endurecimento das pastas geopoliméricas, nota-se isso devido a presença de certos teores de aluminossilicatos e solução alcalina não dissolvidos na porosidade. Esse fator facilita a formação eflorescência que ocorre devido a presença de íons alcalinos presentes em excesso no processo de secagem, estes são levados para a porosidade aberta e para a superfície da pastas, assim reagindo com o CO₂ que está presente na atmosfera, com isso ocorre a formação de cristais que podem causar trincas no material, comprometendo a sua resistência.

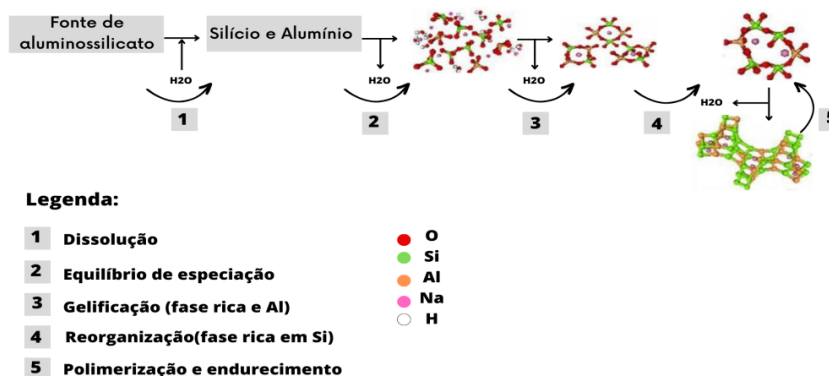
Este trabalho visa avaliar a aplicação de vibração e pressão durante o endurecimento das pastas geopoliméricas, buscando diminuir a absorção de água e a porosidade aberta, tornando menor a ocorrência do fenômeno de eflorescência e consequentemente aumentando a resistência do material.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Os geopolímeros são polímeros inorgânicos que são obtidos através da polimerização de matérias-primas de origem geológica que contenham aluminossilicatos. No processo de geopolimerização ocorre uma reação química em condições alcalinas (DAVIDOVITS, 2002 apud DIAS 2012). A ativação alcalina é uma técnica de agrupamento de partículas de materiais que apresentam elevado teor de sílica e alumina, ambos amorfos, em um ambiente alcalino, estes formam um material cimentício que é capaz de formar um encapsulamento de resíduos minerais tendo um baixo custo energético (FÉLIX, 2016).

Os processos de geopolimerização ocorrem por meio de alguns mecanismos como: dissolução, equilíbrio das espécies, gelificação, reorganização, polimerização e endurecimento. A dissolução do aluminossilicatos amorfo acontece devido a forma rápida em que ocorre a hidrólise alcalina na superfície do material, o que resulta na liberação de aluminato e silicato em solução, estes são acrescentados a solução dando origem a uma mistura de aluminato e silicato de alumínio, assim permitindo a obtenção de uma solução supersaturada que dá origem a um gel, com oligômeros na fase aquosa que libera a água absorvida na dissolução, permitindo a formação de uma rede através da condensação. Ao passar a etapa de gelificação ocorre uma reorganização no sistema que causa o aumento da conexão do gel na rede, ocasionando a síntese de aluminossilicato tridimensional e a formação de algumas espécies poliméricas (DUXSON *et al.*, 2006 apud ALMEIDA, 2018), na figura 1 é possível notar o processo de geopolimerização.

Figura 1: Modelo conceitual de geopolimerização (NaOH)



Fonte: Adaptado de DUXSON, 2007

2.1 Ativação Alcalina

A alteração causada na estrutura dos materiais ocorre devido a uma reação denominada como ativação alcalina, esta acontece em materiais silicosos ou sílico-aluminosos, que ao estarem em contato com a água reagem com o hidróxido de cálcio formando assim composto com propriedade cimentícias, o que se dá devido ao processo de polimerização. Esse processo é caracterizado por ser uma reação de hidratação de aluminossilicatos, esta reação ocorre geralmente com a utilização de hidróxido alcalinos ou alcalino-terrosos (ALONSO E PALOMO, 2001 apud DUARTE, 2020).

Como percursos é utilizado o caulim, com ele a ativação alcalina é responsável pela liberação do alumínio e silício. Já o ativador dessa reação pode ser um cátion ou um hidróxido de metal alcalino (XU e VAN DEVENTER, 2000 apud DUARTE, 2020). Na literatura atual o hidróxido de sódio (NaOH) vem sendo o mais utilizado como parte da solução ativadora, isso ocorre devido ao seu baixo custo (BORGES, *et al.*, 2014).

Para a utilização do caulim na produção dos geopolímeros é necessário realizar um processo de calcinação, que consistem em submeter o caulim a uma faixa de temperatura de 600-800°C o que permite a obtenção do metacaulim com alta reatividade (AUTEF *et al.*, 2013a; BICH *et al.* 2009; JUENGER; SIDDIQUE, 2015 apud COSTA, 2020). Esse processo faz com que a caulinita perca os grupos de OH, o que dá origem a uma nova estrutura amorfa, denominada de metacaulinita (RASHAD, 2013 apud COSTA, 2020). Estudos realizados mostram que a utilização de outros precursores como a argila comum pode ser usada para a obtenção do geopolímero, apresentando bons resultados. Essa argila pode passar por um tratamento térmico a 500-600°C tornando-se um material muito reativo ou natural como a argila seca ou moída (DAVIDOVITS, 2020).

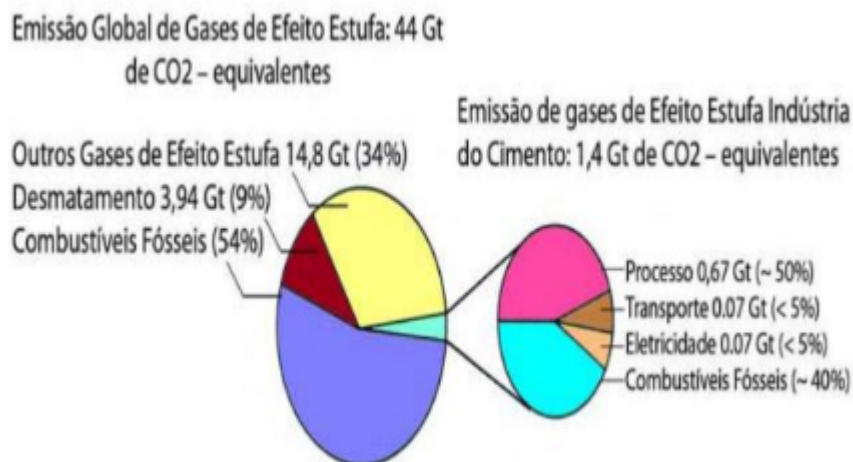
2.2 Geopolímero como aglomerante ao cimento Portland

O cimento Portland é o material de construção mais utilizado no mundo, usado em combinação com concretos e argamassas e confere-lhes boa maleabilidade no estado fresco. Porém devido ao seu alto consumo, o mesmo tem gerado preocupações quanto ao seu processo produtivo, pois em uma das etapas mais importantes, a clinquerização, é necessário a realização da queima de matérias-primas como calcário e a argila. Contudo, as temperaturas da queima dessas matérias-primas giram em torno de 1.500°C, que por sua vez liberam grandes quantidades de dióxido de carbono (SINDICATO, 2011).

Segundo Maury (2012), isso nos mostra que a indústria cimenteira é responsável por cerca de 3% das emissões globais de gases de efeito estufa e cerca de 5% das

emissões de CO₂. Conforme demonstrado na figura 2.

Figura 2: Emissões de gases do efeito estufa das indústrias cimenteiras em 2000



Fonte: MAURY, *et al.* (2012, p.79)

Devido à crescente preocupação com o meio ambiente, tem-se impulsionado a busca por processos produtivos mais sustentáveis e estimulado pesquisas mundiais para reduzir as emissões da indústria cimenteira (BORGES, 2014).

Uma alternativa sustentável para reduzir as emissões de CO₂ é a utilização de aglomerantes alternativos ao cimento Portland. A utilização dos geopolímeros como aglomerante alternativo se dá devido às vantagens ecológicas e físico-químicas, quando se comparados ao cimento Portland. (BORGES, 2014).

Os benefícios ecológicos se refletem no fato de que a produção pode ser realizada em temperatura ambiente ou em temperaturas de até 80°C sem liberação significativa de CO₂ na atmosfera. As propriedades físico-químicas garantem propriedades especiais, como resistência mecânica de rápido desenvolvimento e excelente resistência química. Segundo Davidovits (1994), o cimento geopolimérico curado à temperatura ambiente pode atingir uma resistência à compressão de 20 MPa em 4 horas a 20°C. Porém, dependendo das condições de síntese e cura, este material pode atingir valores de resistência à compressão de 70 a 100 MPa (TEIXEIRA PINTO, 2004). Portanto, devido ao seu grande potencial ecológico e altas propriedades físico-químicas, uma de suas aplicações mais promissoras é naturalmente a substituição do cimento em argamassas e concretos na construção civil.

Vem sendo desenvolvidos estudos que avaliam a aplicação de resíduos de mineração na produção de materiais cimentícios, como geopolímeros. Esse resíduo é utilizado como um agregado fino (RACANELLI, 2022). A extração de minerais resultam na geração de resíduos, entre eles o rejeito de minério de ferro, que precisa ser armazenado, porém este armazenamento apresenta custos, problemas de segurança e danos ao meio ambiente (ARAGÃO, 2008 apud DUARTE, 2020).

2.3 Barragens, aproveitamento e redução de rejeitos

A expansão mundial no âmbito mineral, conivente a ampliação econômica e tecnológica, vinculada, de forma sustentável e economicamente factível, o aproveitamento de minérios de baixo teor ou mesmo aqueles de difícil beneficiamento vem se consolidando no cenário atual. Essa circunstância conduz a um aumento significativo na quantidade de rejeitos produzidos (CARDOSO, 2016).

Esse aumento, resulta proporcionalmente no crescimento das estruturas armazenadoras e de sua capacidade de armazenamento. Os diversos acidentes ocorridos em virtude dessa elevação, despertam a para a questão de segurança destas estruturas. Contudo a disposição controlada dos rejeitos parece causar um impacto negativo no custo do processo produtivo, não trazendo benefícios imediatos para a empresa mineradora. As tecnologias inseridas no projeto de construção de barragens são inversamente proporcionais à evolução tecnológica dos projetos de mineração (SOARES, 2010).

A construção das barragens pode se dar por meio de processos comumente utilizados, como de terra compactada ou pela utilização do próprio material resultante do beneficiamento ou, ainda, com o resíduo. Essas construções devem atender às normas impostas com a finalidade de proteção ambiental e de segurança a todos os envolvidos na operação, além de inserir-se como parte integrante do processo produtivo, atendendo, por exemplo, às necessidades de recuperação e introdução da água no circuito da mina e da usina de concentração. Visando como objetivo a possibilidade de, no futuro próximo, aproveitar este rejeito como um bem mineral, com avanço tecnológico e de pesquisas, conjuntamente com a escassez de recursos minerais e a crescente preocupação ambiental, poderão impulsionar esse processo (SOARES, 2010).

No que se refere às condições de segurança e meio ambiente destaca-se a ocorrência de rompimento dessas barragens, como os ocorridos em Mariana no de 2015 e em Brumadinho no ano de 2019, essas barragens eram compostas por uma estrutura de terra, continham os materiais provenientes do processo de beneficiamento de minério, estes materiais eram armazenados em forma de polpa que consiste em uma mistura de água e sólidos, ambas as cidades fazem parte do quadrilátero ferrífero, um geoparque localizado em Minas Gerais (COTA E JÚNIOR, 2021).

2.4 Quadrilátero Ferrífero Geoparque (Minas Gerais)

Região do estado de Minas Gerais, localizada na porção centro-sudeste do estado, ocupando uma área aproximada de 7.200 km², tratando-se de uma região de relevo predominantemente montanhosa. A nomenclatura “Quadrilátero” é baseada no arranjo geométrico de sua morfoestrutura, região grandemente impactada pela exploração, ocasionando assim diversos problemas ambientais, sobretudo advindas de resíduos provenientes da extração mineral (MACHADO, 2009 apud AZEVEDO, 2012).

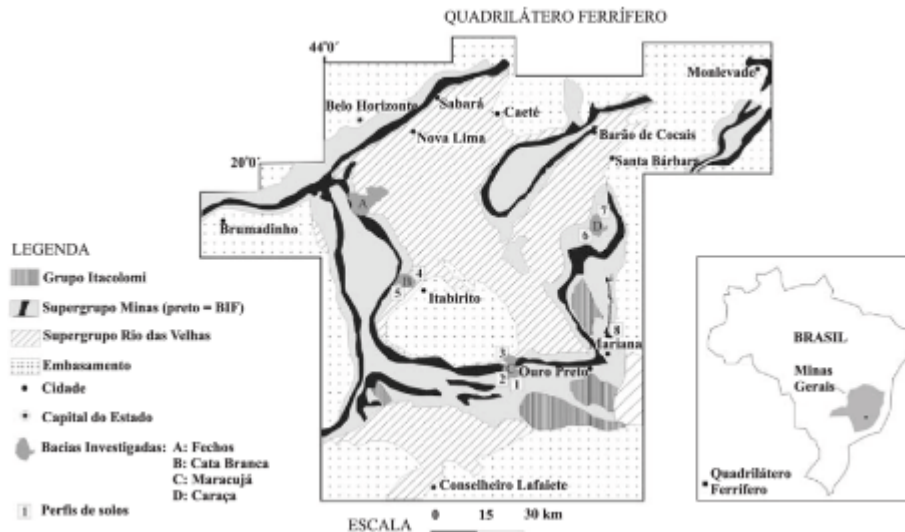
O geoparque corresponde a um bloco de estruturas geológicas da era Pré-Cambriano, elevadas em seus quatro lados por erosão diferencial. Destarte, quartzitos e itabiritos formam cristas nas altitudes de 1300 a 1600 metros; tais acontecimentos retratam o alinhamento da serra do Curral, ao norte, da serra do Ouro Branco, ao sul, da serra da Moeda, a oeste e, a leste, o conjunto formado pela serra do Caraça e o início da serra do Espinhaço (BARBOSA e RODRIGUES, 1967 apud AZEVEDO, 2012).

A “região das minas” do período colonial, onde foram encontrados os mais diversos e afluentes depósitos auríferos que impulsionaram a economia brasileira no Ciclo do Ouro. Além da abundância desse mineral, o território em questão apresentou-se como uma das maiores reservas de minério de ferro de alto teor do mundo, além de depósitos de outros minerais (CASTRO, 2020).

Minério de ferro, atualmente, na indústria extrativa, é a nomenclatura utilizada para tratar todos os termos compostos por óxidos e hidróxidos de ferro (hematititos e magnetititos) e quartzo (itabiritos), que sejam friáveis ou possam ser moídos em processos relacionados às operações unitárias. Atualmente são conhecidos mais de 1.400 minerais com ferro em sua estrutura, porém, menos de 0,5% têm concentração e abundância natural para serem considerados minerais de minério (CASTRO, 2020).

Magnetita (Fe_3O_4), Hematita (Fe_2O_3), Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e Siderita ($\text{Fe}(\text{CO}_3)$), são alguns dos exemplares de minérios de ferro encontrados na região. Os estudos mineralógicos realizados previamente no solo é um aspecto decisivo na indústria mineral, visto que, a partir das ocorrências dessas associações mineralógicas, faz-se todo um planejamento sobre a lavra e o beneficiamento do minério regional. Por meio deste e da figura 3, nota-se que na zona de alto strain (porção leste do Quadrilátero ferrífero) prevalecem as hematitas, no tempo em que na zona de baixa deformação, prevalecem a Martita e a Magnetita (ROSIÈRE *et al.*, 1993 apud CASTRO, 2020).

Figura 3: Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Alkmim & Marshak (1998).

A produção de minérios de ferro do Quadrilátero ferrífero constitui participação indeclinável para o desdobramento socioeconômico de Minas Gerais, contribuindo com 29% do total de exportações. Acrescentando também a produção de ferro e aço, o percentual de contribuição é elevado para 55%. Considerando um total de exportação do estado de 24,4 bilhões de dólares, os produtos de minério de ferro e aço do território estudado representam um total de 13,4 bilhões de dólares em exportações, contribuindo assim vertiginosamente para a economia brasileira (CASTRO, 2020).

O altaneiro volume de produção de minérios de ferro provenientes do Quadrilátero Ferrífero observada nas últimas décadas, originou também um eminente concentrado de rejeitos, resíduos oriundos de processos de beneficiamento mineral. Barragens de contenção de rejeitos com alteamentos por jusante, para montante ou por linha de centro foram os métodos convencionalmente empregados no Quadrilátero (SOARES, 2010 apud CASTRO, 2020).

3. METODOLOGIA

3.1 Materiais e métodos

Foram utilizados os seguintes materiais para a produção dos corpos de provas: caulinita, silicato de sódio, hidróxido de sódio e resíduo do minério de ferro arenoso. Todos os materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento do trabalho foram disponibilizados pelo CDTN.

Os equipamentos utilizados durante a produção dos corpos de prova e os ensaios

realizados foram:

Tabela 1: Equipamentos utilizados para a produção dos corpos de prova

Equipamentos	Modelo	Fabricante
Estufa	3	Ícamo
Balança	9094 plus	Prix
Mufla	22762	CDTN/CNEN
Paquímetro	29959	
Balança	21800	

Fonte: Elaborado pelos Autores

3.2 Geopolímeros

Na produção dos corpos de provas foi utilizado o metacaulim como percurso, silicato de sódio como ativador e resíduo de minério de ferro como agregado, os corpos de provas foram moldados em corpos cilíndricos onde a altura é o dobro do diâmetro sendo 10 cm e 5 cm respectivamente, os corpos de provas foram submetidos a vibração, vibração mais pressão e somente a pressão. O processo foi realizado com a aplicação da vibração em um intervalo de tempo de 10 e 20 segundos, a pressão aplicada foi de 5 e 10 kPa. Os corpos de provas que foram submetidos a vibração e pressão de forma conjunta foram vibrados e prensados por 10 segundos com uma pressão de 5 kPa e 20 segundos com uma pressão de 10 kPa.

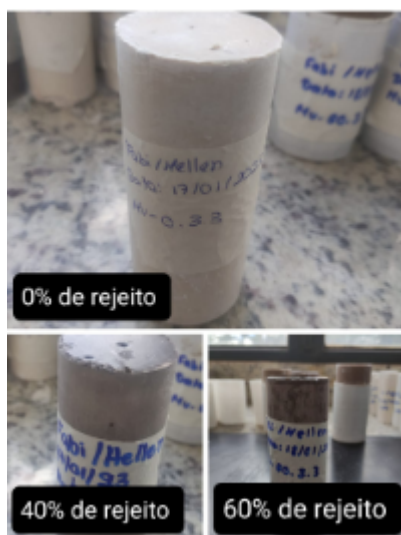
Foram produzidos geopolímeros com algumas composições, sendo elas: 0% de resíduo, 40% de resíduo e 60% de resíduo. Os corpos de provas foram obtidos através da mistura dos componentes. A figura 4 apresenta a argamassa geopolimérica e na figura 5 os corpos de provas produzidos com as composições descritas.

Figura 4: Argamassa geopolimérica



Fonte: Elaborado pelos Autores

Figura 5: Corpos de provas produzidos



Fonte: Elaborado pelos autores

3.3 Caulinita

A caulinita precisa ser submetida a um processo de calcinação para ser utilizada na produção do geopolímero. Ela deve ser levada à mufla por um período de 4 horas com uma taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até atingir 800° . Parte do material é retirado para realização dos testes de caracterização.

3.4 Resíduo de Minério

Os resíduos utilizados são oriundos da etapa de flotação do minério de ferro, seca-se e desagrega-se para a sua utilização na produção dos corpos de provas.

3.5 Caracterização

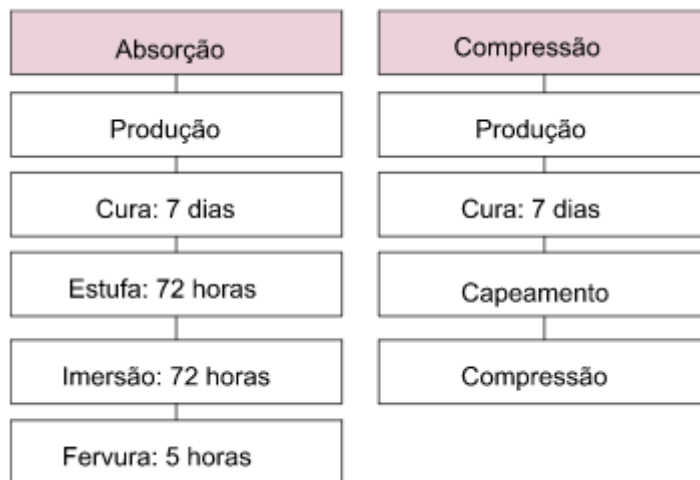
Para a realização da caracterização realizada no decorrer do trabalho, foram utilizadas as seguintes técnicas: a fluorescência de raio-x (FRX) e difração de raio-x (DRX).

Com a fluorescência de raio-x é possível identificar a composição química dos compostos e concentração dos elementos presentes. Com o ensaio de difração de raio-x é possível observar a estrutura cristalina do material e quantificar as fases.

3.6 Teste Realizados:

Foram realizados testes de absorção, de acordo com a norma NBR 9778 e de compressão realizados de acordo com a norma NBR 7215. Todos os corpos de provas foram submetidos a um processo de cura por um período de 7 dias antes de serem utilizados nos testes. Na figura 6 está representado as etapas realizadas durante a absorção e compressão, na figura 5 é possível visualizar os corpos de provas que foram submetidos aos ensaios.

Figura 6: Absorção e compressão



Fonte: Elaborado pelos Autores

De acordo com a NBR 9778 a absorção tem como objetivo determinar a absorção de água, índice de vazão por imersão e fervura, e massa específica de argamassas. Por definição é determinado os seguintes parâmetros:

1. Absorção da água por imersão: relaciona o processo de condução da água que busca ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido.
2. Índice de Vazio: é determinado através da relação entre o volume de poros permeáveis e o volume da amostra.
3. Massa específica da amostra seca: é a relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo poros ambos os poros (permeáveis e impermeáveis).
4. Massa específica da amostra saturada: relação entre a massa do material saturado e o volume total da amostra incluindo ambos os poros.
5. Massa específica real: relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis.

Esses parâmetros são determinados através das seguintes equações:

1. Absorção de água: Ocupação de poros permeáveis de um corpo sólido, pela água.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

A= Absorção de água

m_{sat} = massa da amostra saturada

m_s = massa da amostra seca

2. Índice de Vazio: determina a relação entre o volume de poros e o volume total da amostra.

$$Iv = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

Iv = Índice de vazio

m_{sat} = massa da amostra saturada

m_s = massa da amostra seca

m_i = massa da amostra imersa em água

3. Massa específica da amostra seca: Determina a relação entre a massa da amostra seca e o volume total da amostra (Incluindo os poros permeáveis e impermeáveis).

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (3)$$

Onde:

ρ_s = Massa específica da amostra seca

m_{sat} = massa da amostra saturada

m_s = massa da amostra seca

m_i = massa da amostra imersa em água

4. Massa específica da amostra saturada: Determina a relação entre a massa da amostra saturada e o volume total (Incluindo os poros permeáveis e impermeáveis).

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (4)$$

Onde:

ρ_r = Massa específica real

m_s = massa da amostra seca

m_i = massa da amostra imersa em água

5. Massa específica real: Relação entre a massa da amostra seca e o seu volume (Excluído os poros permeáveis).

$$\rho_{sat} = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (5)$$

Onde:

ρ_{sat} = Massa específica da amostra saturada

m_s = massa da amostra seca

m_i = massa da amostra imersa em água

Para determinar os fatores especificados pela norma NBR 9778, as amostras foram levadas à estufa por 72 horas e em seguida foram pesadas, obtendo assim a sua massa seca, após esse processo elas foram submersas em água à temperatura ambiente durante 72 horas. Ao ser retirada da imersão as essas foram imersas a temperatura de ebulição por um intervalo de tempo de 5 horas. Após esses procedimentos foi medida a massa em imersão.

Em todas essas etapas as amostras foram pesadas, a fim de obter os parâmetros determinados pela norma NBR 9778, os parâmetros obtidos em cada etapa estão relacionados na tabela 2. A figura 7 mostra as etapas realizadas durante os ensaios de absorção.

Tabela 2: Parâmetros ensaio de absorção

Etapa	O que foi feito	Período	Parâmetro determinado
1	Amostra levada a estufa	72 horas	Massa após a estufa (ms)
2	Imersão em água	72 horas	
3	Fervura	5 horas	Massa imersa em água após a estufa (mi)
4	Massa medida em imersão		Massa após imersão e fervura (msat)

Fonte: Elaborado pelos Autores

Figura 7: Etapas do ensaio de absorção



Fonte: Elaborado pelos Autores

3.7 Compressão

A norma NBR 7215 tem por objetivo determinar a resistência à compressão do cimento Portland. Para iniciar os ensaios de compressão os corpos de provas passam pelo processo de capeamento que ocorre para que a tensão aplicada no corpo de prova possa ser distribuída de maneira uniforme sobre toda a superfície, este é realizado com enxofre fundido, atendendo as especificações da norma.

Após o capeamento, os corpos de prova são levados para a prensa, onde são

submetidos a pressão, ao romperem o computador registra o valor da tensão que foi aplicada sobre os corpos de provas. Na figura 8 é possível observar as etapas do ensaio de compressão.

Figura 8: Ensaio de Compressão



Fonte: Elaborado pelos Autores

É importante destacar que foram produzidos 3 corpos de provas com os mesmos traços, os valores obtidos durante os ensaios foram tabelados e usados para a obtenção da média dos valores. Na tabela 3 é possível observar a nomenclatura dada para cada traço analisado.

Tabela 3: Nomenclatura dos traços

CÓDIGO	% REJEITO	VIBRAÇÃO (SEGUNDOS)	PRESSÃO KILOPASCAL
M1	40	0	0
M2	40	10	0
M3	40	20	0
M4	40	0	5
M5	40	0	10
M6	40	10	5
M7	40	20	10
M8	60	0	0
M9	60	10	0
M10	60	20	0
M11	60	0	5
M12	60	0	10
M13	60	10	5

M14	60	20	10
-----	----	----	----

Fonte: Elaborada pelos autores

A baixa pressão corresponde ao valor de 5 Kilopascal (kPa) e a alta pressão corresponde a 10 Kilopascal (kPa), a baixa vibração corresponde a 10 segundos e a alta vibração a 20 segundos.

Os resultados obtidos foram comparados com os existentes na literatura com o objetivo de avaliar se a influência da pressão e vibração apresentam resultados significativos sobre a absorção e compressão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse tópico estão apresentados os resultados da caracterização do rejeito e do metacaulim, bem como os resultados dos ensaios de absorção e compressão. Os resultados obtidos foram comparados com dados disponibilizados pela literatura com a finalidade de observar a influência da vibração e pressão sobre a absorção de água e compressão.

4.1 Difração de raio-x e fluorescência de raio-x

Na caracterização dos materiais utilizados foi analisado o caulim, o metacaulim e o resíduo. A caracterização do caulim foi feita para determinar os materiais e as fases presentes antes da calcinação. No caulim foi observado os componentes relacionados na tabela 4.

Nota-se que no caulim o componente presente em maior quantidade é a caulinita que é determinada como um argilomineral e moscovita classificada como um silicato responsável pela formação de rochas.

Tabela 4: Resultado DRX - Caulim

Composto	Fórmula Química	Composição %
Anatase	TiO ₂	0,48
Caulinita	Al ₂ Si ₂ (Si ₃ Al)(OH) ₄	75,08
Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH ₂)	17,92
Quartzo	SiO ₂	6,52

Fonte: Elaborada pelos autores

Nos resultados apresentados para o metacaulim é possível notar que existe a presença de uma fase amorfa, que é resultado do processo de calcinação da caulinita. Na tabela 5 é possível observar que essa fase amorfa representa a maior porcentagem do material.

Tabela 5: Resultado DRX - Metacaulim

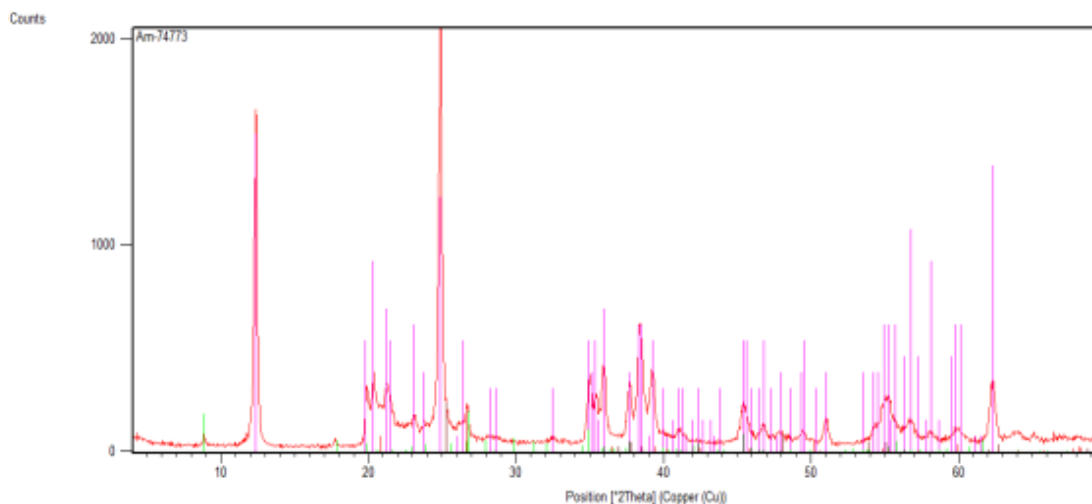
Composto	Fórmula Química	Composição %
Calcita	CaCO ₃	23,72
Domitila	Ca(Mg,Fe)(CO ₃)	7,23
Quartzo	SiO ₂	2,64
Fase Amorfa	-	66,41

Fonte: Elaborada pelos autores

As figuras 9 e 10 apresentam os gráficos de difração de raio-x obtidos para a caulinita e o metacaulim.

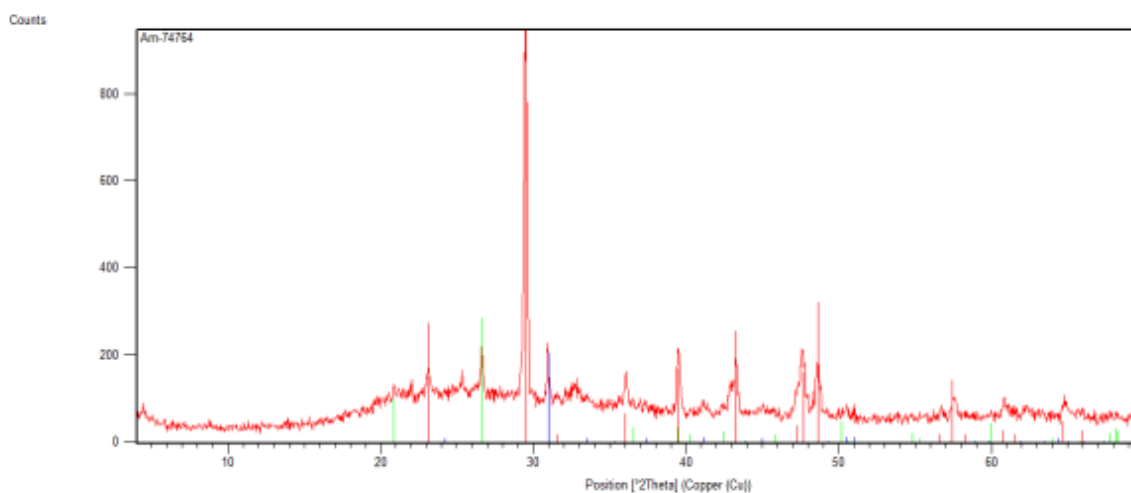
Ao analisar os gráficos disponibilizados é possível observar a diferença dos picos apresentados em ambos, sendo que no metacaulim nota-se a presença de ruídos gráficos e a diminuição da ocorrência de picos em comparação ao caulim.

Figura 9: Gráfico DRX - Caulim



Fonte: Elaborada pelos autores

Figura 10: Gráfico DRX- Metacaulim



Fonte: Elaborada pelos autores

Com os gráficos de raio-x é possível observar que no caulim existe a presença de picos mais elevados para a caulinita e a moscovita. Para o metacaulim, ao analisar o gráfico, constata-se a presença de uma fase amorfa, que é caracterizada pelos ruídos formados.

Em relação ao resíduo utilizado como agregado foi observado que em maior quantidade se destaca o quartzo, como demonstrado na tabela 6. É possível observar também a presença de dois minerais de óxido de ferro, sendo eles a hematita e a goethita.

A tabela 7 dispõe dos dados qualitativos dos compostos através da fluorescência de raio-x.

A presença do quartzo ocorre devido a sua grande abundância, eles são caracterizados pela sua alta resistência e é apresentada como constituinte principal da areia. Já a presença da hematita e da goethita ocorre de acordo com as especificações e condições do solo que favorecem ou não a sua formação.

Resíduos que apresentam quartzo e óxido de ferro em sua composição podem ser definidos como de classe 2 pela norma NBR 10.004/2004, estes são compostos por água, minério de ferro e areia. Sendo classificados como não inflamáveis, não corrosivos e não tóxicos.

Tabela 6: Resultado DRX - Resíduo Arenoso

Composto	Fórmula Química	Composição %
Quartzo	SiO ₂	72,34
Hematita	Fe ₂ O ₃	15,8
Goethita	FeO(OH)	11,86

Fonte: Elaborada pelos autores

A tabela 7 traz a quantificação dos óxidos presentes em cada material analisado, destacando-se no metacaulim e caulim a presença do óxido de alumínio (Al₂O₃) e do dióxido de silício (SiO₂), que se destaca também no resíduo juntamente com óxido de ferro (Fe₂O₃).

Tabela 7: Resultados obtidos no FRX

Teor %			
Óxido	Metacaulim	Caulim	Resíduo
Al ₂ O ₃	31,42	38,6	0,34
CaO	14,08	0,01	0,08
Cr ₂ O ₃	<0,01	<0,01	<0,01
Fe ₂ O ₃	0,86	0,72	25,01
K ₂ O ₃	0,24	0,31	<0,01
MgO	3,63	<0,1	<0,1
MnO	<0,01	<0,01	<0,01
Na ₂ O	<0,1	<0,1	<0,1
P ₂ O ₅	<0,01	<0,01	0,02
SiO ₂	39,34	45,44	73,51
TiO ₂	0,41	0,44	0,05
ZrO ₂	<0,01	0,02	<0,01

Fonte: Elaborada pelos autores

Os resultados presentes na fluorescência de raio-x confirmam os resultados obtidos na difração de raio-x. Neste se destacam o teor de resíduo, que apresenta um em maiores quantidades sílico com 73,51%, óxido de ferro 25,01% e o óxido de alumínio em menor quantidade com 0,34%. Com a presença desses compostos o resíduo pode ser classificado como um material pozolânico que aumenta a resistência de materiais

cimentícios.

4.2 Absorção de água e resistência à compressão

Para avaliar a absorção e resistência à compressão foi realizada uma comparação entre os dados obtidos nos ensaios durante os ensaios de absorção e compressão, com o objetivo de avaliar a influência da vibração e pressão sobre os corpos de provas.

Com os ensaios de absorção foram obtidos os valores dispostos na tabela 8. Os valores são a média de 3 corpos de provas para cada variável, sendo elas vibração, pressão e vibração e pressão em conjunto. Na tabela 8 estão dispostos os dados obtidos durante a realização dos ensaios de absorção.

Tabela 8: Resultados obtidos nos ensaios de absorção

40% de Resíduo					
Vibração		Pressão		Vibração+Pressão	
Código	Absorção %	Código	Absorção %	Código	Absorção %
M1	2,77	M4	18,26	M6	17,93
M2	6,36	M5	21,16	M7	17,92
M3	6,07	-		-	
60% de Resíduo					
Vibração		Pressão		Vibração+Pressão	
Código	Absorção %	Código	Absorção %	Código	Absorção %
M8	6,09	M11	15,93	M13	17,93
M9	5,12	M12	25,3	M14	17,92
M10	9,89	-		-	

Fonte: Elaborada pelos autores

De acordo com Duarte (2020) as argamassas geopoliméricas à base de metacaulim com 40% agregado de rejeito absorvem 21,3% de água, enquanto as argamassas com 60% de agregado absorvem 20,1%. Os valores obtidos pelo autor foram dispostos na tabela 7 e tiveram a sua média calculada.

Analisando a tabela 8 é possível observar que os valores de absorção são menores do que os obtidos na literatura, diversos fatores contribuem para esse acontecimento, desde o tempo e velocidade de agitação, composição, moldagem dos corpos de provas, concentração, temperatura, pH entre outros (LIMA, 2018).

Nota-se que os valores dos corpos de provas com nenhuma vibração ou apenas submetidos a vibração apresentam o menor percentual de absorção de água. Enquanto os corpos de provas submetidos ao processo de vibração e pressão apresentam um percentual maior, em comparação aos que são submetidos apenas a vibração. Em comparação aos obtidos na literatura, todos os corpos de provas apresentaram um percentual menor de absorção, com exceção ao M12, que foi o único com um percentual maior.

Em relação aos resultados obtidos na compressão foi realizado a média dos valores obtidos para 3 corpos de provas, estes valores foram relacionados na tabela 9.

Tabela 9: Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão

40% de Resíduo					
Vibração		Pressão		Vibração+Pressão	
Código	Resistência à Compressão	Código	Resistência à Compressão	Código	Resistência à Compressão
M1	47,9	M4	23,2	M6	49,43
M2	47,37	M5	17,62	M7	58,08
M3	54,04	-		-	
60% de Resíduo					
Vibração		Pressão		Vibração+Pressão	
Código	Resistência à Compressão	Código	Resistência à Compressão	Código	Resistência à Compressão
M8	39,22	M11	39,49	M13	41,75
M9	32,51	M12	40,92	M14	47,1
M10	42,7	-		-	

Fonte: Elaborada pelos autores

Em relação a resistência à compressão Duarte (2020) obteve como média dos resultados para a composição 40% de resíduo uma resistência de 39,16 MPa e 60% com o valor de 31,99 MPa. Comparando os resultados da tabela 8 e os valores encontrados na literatura, é possível notar que o corpo de prova M1 e M8 tiveram uma resistência maior, eles são referentes aos corpos de provas sem vibração. Ao que se refere às resistências dos corpos de provas que tiveram a aplicação da pressão e vibração é possível notar que apresentaram um aumento em sua resistência, exceção dos corpos M2, M4 e M5. O que mostra que em corpos de provas com composição de 40% de resíduo a baixa vibração (10 segundos), e a pressão apenas não apresenta bons resultados, mas com o dobro da vibração ou a vibração acoplada com a pressão é possível obter dados significativos.

CONCLUSÃO

Com a difração de raio-x é possível chegar a conclusão de que o tratamento térmico sofrido pelo caulim resultou na calcinação do material, permitindo a liberação do alumínio (Al) e do silício (Si), com isso tornando possível a realização da reação de geopolimerização.

A utilização de resíduos de mineração contribui para o aumento da resistência dos corpos de provas, isso ocorre devido a suas características como um material pozolânico, porém estudos comprovam que a incorporação de 60% de resíduo aos corpos de provas apresentam um percentual reduzido em comparação aos de 40%. Duarte (2020) afirma que uma justificativa para essa ocorrência é a adição de materiais que contenham o elemento ferro (Fe), a precipitação deste elemento resulta na formação de oxi-hidróxidos ou hidróxido, que contribuem para a formação de íon OH⁻ na dissolução, o que dificulta a dissolução das matérias primas assim causando impactos na formação de produtos geopoliméricos.

Em relação a compressão nos corpos de prova com 40% de resíduo observou que a influência da vibração foi significativa em relação a pressão, e que a utilização de ambas em conjunto apresentou bons resultados. Nos corpos de prova com 60% de resíduo obteve-se resultados significativos em alta vibração e pressão separadamente,

apresentando ainda resultados mais elevados quando ambas são utilizadas em conjuntos.

Em contrapartida foi possível observar que a absorção em corpos de provas sem vibração e sem pressão apresentou um percentual de absorção menor, do mesmo modo nota-se que a pressão e a vibração aplicada separadamente aos corpos de provas tem um percentual menor do que os corpos de provas que tiveram ambas aplicadas em conjunto. Isso demonstra que a influência da pressão e vibração sobre os corpos de provas não foram significativas em relação a absorção, mas cabe ainda estudos que demonstrem os fatores que influenciaram nesses resultados.

Os estudos realizados neste trabalho mostra que a influência da vibração e da pressão causam impactos significativos sobre a resistência dos geopolímeros, mas também demonstra que em relação a absorção a pressão e a vibração aumentam a capacidade de absorção dos corpos de provas o que também influencia de maneira negativa na resistência dos materiais. Com isso, cabe a revisão dos métodos utilizados no preparo dos corpos de provas, analisando os fatores como tempo e velocidade de agitação, pH, moldagem entre outros.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso contou com a ajuda de diversas pessoas, dentre as quais agradecemos:

Primeiramente a Deus que nos permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de nossas vidas, e não somente nestes anos como universitárias, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

As nossas famílias, parentes e amigos que com seus incentivos nos fizeram chegar à conclusão desse ciclo e começo de uma nova carreira. E todos que direta ou indiretamente fizeram parte de nossa formação.

À Instituição pelo ambiente criativo e amigável que nos proporcionou, e seu corpo docente, direção e administração.

À nossa orientadora Vanessa Mota, pelo empenho dedicado à elaboração deste trabalho. Aos professores Estevão Magno, Madrith Sthel, Margarete Pereira e Pedro Prates pela orientação acadêmica, apoio e confiança ao longo do curso e que, com empenho, se dedicam à arte de ensinar.

A todos os professores que nos proporcionaram o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no nosso processo de formação profissional, pelo tanto que se dedicaram a nós, não somente por terem nos ensinado, mas por terem nos feito aprender. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os nossos eternos agradecimentos.

E a todos que participaram das pesquisas, principalmente ao apoio por parte da Instituição CDTN pela disponibilidade do espaço e equipamentos, e a todos os professores e investigadores pela colaboração e disposição no processo de obtenção de dados.

TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos a serem desenvolvidos se destacam os seguintes temas: estudos dos fatores que influenciam os resultados obtidos, estudo do tempo de cura em temperaturas diferentes e a avaliação de diferentes maneiras de preparo e moldagem.

REFERÊNCIA BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, Thelma Miranda de. **USO POTENCIAL DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO ALUMÍNIO NA PRODUÇÃO DE GEOPOLÍMEROS**. 2018. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Análise Ambiental Integrada, Universidade Federal de São Paulo, Diadema, 2018.

ALONSO, S.; PALOMO, A. **Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio**. *Materials Letters*, v.47, n.1-2, p.55-62, 2001.

ARAGÃO, G. A. S. **Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro**. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: **Agregado miúdo - Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman - Método de ensaio**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

AUTEF, A. et al. **Role of metakaolin dehydroxylation in geopolymer synthesis**. *Powder Technology*, v. 250, p. 33–39, 2013a.

AZEVEDO, Úrsula Ruchkys de; MACHADO, Maria Márcia Magela; CASTRO, Paulo de Tarso Amorim; RENGGER, Friedrich Ewald; TREVISOL, Andrea; BEATO, Décio Antônio Chaves. **Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): proposta**. In: SCHOBENHAUS, Carlos;

BARBOSA, Getúlio V.; RODRIGUES, David Márcio dos Santos. **Quadrilátero Ferrífero**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1967. 130p.

BICH, C.; AMBROISE, J.; PÉRA, J. **Influence of degree of dehydroxylation on the pozzolanic activity of metakaolin**. *Applied Clay Science*, v. 44, n. 3–4, p. 194–200, 2009.

BORGES, P. H. R. et al.. **Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II)**. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 2, p. 153–168, abr. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000200011>>.

CARDOZO, Fernando Alves Cantini; PIMENTA, Matheus Montes; ZINGANO, André Cezar. **Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração—uma revisão**. *Holos*, v. 8, p. 77-85, 2016.

COSTA, Leonardo Martins. **Influência da Pozzolanicidade na Ativação Alcalina**. 2020. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Tecnologia na Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

COTA, G.E.M., & MAGALHÃES JÚNIOR, A.P.(2021). **Panorama das barragens de rejeito de minério no Quadrilátero Ferrífero (MG) e suas implicações para a segurança hídrica da Região Metropolitana de Belo Horizonte - MG**. GeoTextos, 17 (1).

DAVIDOVITS, Joseph. **Geopolymer cement**. A review. Geopolymer Institute, Technical papers, v. 21, p. 1-11, 2013.

DAVIDOVITS, Joseph. **Geopolymer chemistry and Applications**. 5. ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2020. 6444 p. (9782954453118).

DIAS, Nuno Amadeu Antunes. **Geopolímeros: Contributos para a redução das eflorações**. 2012. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, 2010.

DUARTE, Glaucia Marcossi Cardoso. **DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA POLIMÉRICA INCORPORANDO REJEITO DE CANDONGA COMO AGREGADO**. 2020. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, Ciência e Tecnologia dos Materiais Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2020.

DUXSON P.; FERNÁNDEZ - JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J.L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A.; van DEVENTER, J. S. J. **Geopolymer Technology: the current state of the art**. Advances in Geopolymer Science & Technology, 2917-2933, 2006.

FÉLIX, Adriano da Silva. **Ativação alcalina de blocos de terra crua**. 2016. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

FERREIRA, Joubert Paulo et al. **OBTENÇÃO DE GEOPOLÍMERO A PARTIR DO METACAULIM COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO DEPOSITADO NA BARRAGEM DE Córrego do Feijão**. In: CONRESOL, 3., 2020, Gramados. Artigo. Gramados: Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 2020. p. 1-10.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. **Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete**. Cement and Concrete Research, v. 78, p. 71–80, 2015.

MACHADO, Nuno; CARNEIRO, Maurício Antônio. **Canadian Journal of Earth Sciences**, Ottawa, v. 29, n. 11, p. 2341-2346, nov. 1992.

MAURY, Maria Beatriz, et al. **Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente**. 95p - Sustentabilidade em debate, Brasília, 2012.

MURILLO, L. M.; DELVASTO, S.; GORDILLO, M.; **A study of a hybrid binder based on alkali-activated ceramic tile wastes and portland cement**. Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites, p. 291–311, 15 Abr 2023.

PUERTAS, F. (1995) **Cementos de escorias activadas alcalinamente: situación actual y perspectivas de futuro, materiales de construcción**. V. 45. N.239.

Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos, organizado por Paulo de Tarso Amorim Castro, Issamu Endo, Antonio Luciano Gandini. - Belo Horizonte: 3i Editora, 2020. 480 p. il. ISBN 978-65-990542-8-0

LIMA, Jofre Silva. **EFEITO DA RELAÇÃO MOLAR $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ E DAS CONDIÇÕES DE CURA NAS PROPRIEDADES DE GEOPOLÍMEROS OBTIDOS COM SILICATO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ**. 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.

RACANELLI, Lêda de Azevedo. **OBTENÇÃO DE GEOPOLÍMERO A PARTIR DE REJEITO DA LAVAGEM DE BAUXITA AMAZÔNICA**. 2022. 121 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Recursos Naturais., Universidade Federal do Pará, Pará, 2022.

RASHAD, A. M. Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition-A comprehensive overview. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 303–318, 2013.

Rosière C.A., Chemale Jr. F., Guimarães M.L.V., 1993. **Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte I: Estruturas e Recristalização**. Geonomos, v.1, nº 1, p. 65-84.

SEVERO, C. G. S.; LIRA, B. S.; COSTA, D. L.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. **Ativação alcalina de resíduos minerais com NaOH**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 8.2, p. 106-109, 2013a

SILVA, Cássio Roberto da (Org.). **Geoparques do Brasil: propostas**. Rio de Janeiro: CPRM, 2012. Cap. 7

SILVA, Juliane Valadares e. **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE GEOPOLÍMEROS MACROPOROSOS COM USO DE PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO**. 2019. 87 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mestre em Construção Civil, Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2010**. 2011. Disponível em: . Acesso em: 21 jan. 2013.

SOARES, L. **Barragem de Rejeitos**. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/769/1/CCL00410010.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2023.

TEIXEIRA PINTO, A. **Sistemas Ligantes Obtidos Por Activação Alcalina do Metacaulino**. Minho, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2004

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. **The geopolymerisation of alumino-silicate minerals.** International journal of mineral processing, v. 59, n. 3, p. 247-266, 2000.