

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA A BASE DE
METACAULINITA E CINZA DE FUNDO

SARA DOS SANTOS SANTARÉM

Manaus

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

SARA DOS SANTOS SANTARÉM

SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA A BASE DE
METACAUINITA E CINZA DE FUNDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais Regionais e Não Convencionais para Estruturas e Pavimentos.

Orientador: Dr. Raimundo Kennedy Viera

Co-orientadora: Dra Adalena Kennedy Vieira

Manaus

2018

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S233s Santarem, Sara dos Santos Santarém
 Síntese e caracterização de argamassa geopolimérica a base de
 metacaulinita e cinza de fundo / Sara dos Santos Santarém
 Santarem. 2018
 79 f.: il.; 31 cm.

 Orientador: Raimundo Kennedy Vieira
 Coorientadora: Adalena Kennedy Vieira
 Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
 Federal do Amazonas.

 1. argamassa geopolimérica. 2. metacaulinita. 3. cinza de fundo.
 4. sustentabilidade. I. Vieira, Raimundo Kennedy II. Universidade
 Federal do Amazonas III. Título

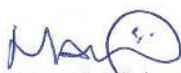
SARA DOS SANTOS SANTARÉM

SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA A BASE DE
METACaulinita e Cinza de Fundo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais Regionais e Não Convencionais para Estruturas e Pavimentos.

Aprovada em 04 de Dezembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira, Presidente.

Universidade Federal do Amazonas



Prof. Dr. Genilson Pereira Santana, Membro.

Universidade Federal do Amazonas



Prof. Dr. Raimundo Humberto Cavalcante Lima, Membro Externo.

Universidade Federal do Amazonas

*Primeiramente a Deus, dono de toda sabedoria, por
me conceder essa oportunidade e a Ele toda glória.
A Minha mãe, Dulciana de Jesus, minha referência de
fé e força, por estar ao meu lado em todos os momentos dessa
trajetória. Ao meu esposo, Marcos Venâncio, por todo amor,
motivação e apoio nessa jornada.
Ao meu Pai, Vivaldo Batista pelas orações,
Minhas irmãs, Leida de Jesus e Luana Santos, pelo
incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço ao DEUS, Meu Amigo, Pai, Ajudador e meu socorro bem presente na angústia, gratidão por ter me direcionado e sustentado nessa caminhada, que enxergo como um lindo presente, pois sem sua presença e força jamais teria vencido. Reconheço que tudo é Dele e para Ele. Está ao meu lado em todos os momentos, É minha base e minha fortaleza, a ELE toda honra e glória para todo Sempre.

À minha Mãe, Dulciana de Jesus dos Santos, meu maior exemplo de persistência, força e fé, motivadora incansável desse sonho, amiga fiel e que nunca me desamparou, sempre acreditou que eu conseguiria passar na seletiva, desenvolver o projeto e concluir esse ciclo. Gratidão pelo Apoio, pelas orações que me sustentaram, pelas palavras de motivação e por todo amor a mim concedido, que acalentaram minha alma em diversos momentos, peço a Deus nunca decepcione-la. Essa vitória é mais sua do que minha, Sempre te Amarei.

Ao meu Esposo, Marcos Venâncio F. Santarém, meu grande parceiro, amigo e amor, meu grande exemplo diário de superação, por todo estímulo e incentivo, por ter renunciado muitos desejos por mim, por ser sempre zeloso e leal, por me amar mesmo nos meus dias mais difíceis e ter paciência e sabedoria para transformá-los e melhorá-los. Por todas as frases sábias que me faziam refletir em meio às lutas, das quais sempre tirava uma lição e me tornava melhor. O nosso amor venceu mais uma vez, obrigada por tudo, Te Amo.

Aos demais integrantes da minha família, meu pai Vivaldo que apesar de pouco convívio me sustentou em oração e motivação, muito obrigada. Minhas irmãs Leida e Luana, obrigada pelas vezes que precisei e vocês com todo amor me ajudaram. Amo vocês, meus presentes de Deus.

Aos tios, primos e amigos, que de perto ou de longe, direta ou indiretamente colaboraram com esta jornada, Tia Lindalva, Tia Dulce, Tia Cléa, Tio Antônio. Primos (a) Ivone, Julinaldo e Ruth me ajudou em alguns ensaios de maneira alegre e motivadora. Aos amigos (a) externos Nadson Felix, Dienne Hellen, Mayara Oliveira, Arliane Farias, Nayra Durante, Larissa Feitosa, Thais Riveiro, Camila Paiva, João Mateus, Ruth Vilanova e Sara Vilanova com os quais compartilhei momentos difíceis

ao longo desses anos e que sempre me ajudaram com palavras positivas e boas vibrações. Vocês são todos muito especiais.

Ao meu professor e orientador, Dr. Raimundo Kennedy Vieira, por toda orientação dada, que muito contribuiu para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Aos Professores Drs. Raimundo Humberto, Adalena Kennedy e Genilson Pereira, por toda a ajuda ao longo desta jornada, por disponibilizarem tempo para contribuir com esse trabalho.

Aos professores Drs. João de Almeida, Campelo e Virgínia por disponibilizarem os laboratórios que são de suas responsabilidades (Materiais, Pavimentação e LAMAC, respectivamente) e contribuírem com meu trabalho.

Ao colega de trabalho, Aedjota Matos, por toda ajuda e conhecimento compartilhado, mesmo em condições adversas conseguimos com muita força e persistência concluir, muito obrigada por tudo.

Aos amigos que fiz durante essa jornada, Frank Albert, Katellen Costa, Luane Ricarte, Fernanda Oikava, Eugênio Borges, Luana Oliveira, Elma Dayane, Henriqueta Lima, Ewerton Mazoni, Frank Hudson, Elaine Figueiredo e Eduarda Pereira, serei eternamente grata por tamanho presente que Deus me concedeu, pela parceria incansável, momentos divertidos, pela torcida positiva, pelo Grupo de WhatsApp “Churras do mestrado” que tornaram essa caminhada mais leve e inesquecível. Em especial a minha amiga Raquel Andrade, pela amizade, parceria, ajuda e motivação. Foram muitos momentos dos quais chorei em seus ombros, ouvi seus conselhos e segui em frente mais confiante, nunca esquecerei de quantas vezes com paciência e amor me disse frases como: “Amiga você consegue.” “Foca e Finaliza.” “Acaba Logo isso.” “Amo você”. Poucas são as palavras para expressar tamanha gratidão por sua vida. A todos, meu muito obrigada, os levarei no coração sempre, Amo Vocês.

Aos técnicos dos Laboratórios da UFAM, Samuel feitoza do Laboratório de Controle de Qualidade da engenharia química (sempre me ajudou no que pode, me cedia Água deionizada e seu banho maria, sempre alegre e prestativo), Sr. Zeca do Laboratório de Pavimentação (que sempre me ajudou disponibilizando espaço para moldar meus Cps e pesas meus materiais.), Sr. Jorge e Nilson do Laboratório de Ensaio de Materiais – LEM (pela ajuda nos ensaios finais, pelos equipamentos que

me ensinaram a utilizar e ela alegria que sempre recebem os alunos, muito obrigada), Miécio Melquiades do Laboratório de materiais (por tantos DRX realizados), Diogo (que contribuío cedendo o espaço e equipamentos do LAMAC), ao Ivan e Beatriz (Bia), ambos da secretaria do programa PPGEC, que sempre dispostos ajudavam a todos no que precisavamos, agradeço todos os outros técnicos que me ajudaram direta e indiretamente.

À EMPRESA KONKREX, por toda a assistência, amparo e ajuda, por me permitir realizar todos os meus ensaios mecânicos e que foi de fundamental importância. Em especial ao Engenheiro Domingos, homem ilustre, de vasto conhecimento, com o qual aprendi muito, sempre muito prestativo e amável, contribuiu muito com esta pesquisa, Obrigada de coração.

Ao auxílio financeiro e apoio tecnológico das Instituições de Ensino e Fomento: UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM/FT; COMISSÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DO NÍVEL SUPERIOR – CAPES; CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO-CNPq.

"Não estou dizendo isso porque esteja necessitado, pois aprendi a adaptar-me a toda e qualquer circunstância. Sei o que é passar necessidade e sei o que é ter fartura. Aprendi o segredo de viver contente em toda e qualquer situação... Tudo Posso Naquele que me Fortalece."

Filipenses 4, 11-13.

RESUMO

O aumento da utilização de materiais cimentícios e as consequências negativas que essa utilização provoca ao meio ambiente, faz com que haja grandes esforços no desenvolvimento de pesquisas que buscam novos materiais, menos poluentes, com compatibilidade técnica e baixo custo. A presente pesquisa apresenta o desenvolvimento e caracterização de argamassas geopoliméricas a base de metacaulinita avaliando a substituição em 25%, 50% e 100% do agregado miúdo por cinza de fundo proveniente de olariais locais e que é um subproduto inevitável e sem destinação sustentável. De forma a obter precursores mais puros, optou-se por produzir a metacaulinita manualmente, a argila caulinitica regional coletada foi calcinada na temperatura de 750 °C durante 4 horas, utilizou-se sílica ativa, água deionizada e hidróxido de sódio como ativador alcalino. Utilizou-se técnicas de fluorescência e difração de raio x para a caracterização química e mineralógica da argila caulinitica e da metacaulinita e através do ensaio de resistência a compressão simples foi obtido o desempenho mecânico dos corpos de prova. Os resultados mecânicos chegaram a 45 MPA em 100% de substituição e também indicaram que proporções menores que 50% são inviáveis, pois reduzem a resistência. Referente as propriedades físicas da mistura, os resultados mostram que as argamassas geopolimérica produzidas no presente trabalho se assemelham as argamassas geopoliméricas estudadas em outras pesquisas. Diante disso, conclui-se que a incorporação de cinza de fundo para produção de argamassas geopoliméricas torna o material tecnicamente compatível com materiais cimentícios convencionais.

Palavras-chave: Argamassa geopolimérica, metacaulinita, Cinza de fundo, sustentabilidade

ABSTRACT

The increased use of cementitious materials and the negative consequences that this causes on the environment, makes great efforts in the development of research that seeks new materials, less polluting, with technical compactness and low cost. The present research presents the development and characterization of geopolymeric mortars based on metacaulinite evaluating the substitution in 25%, 50% and 100% of the small aggregate by background ash from local potteries and that is an unavoidable byproduct and without sustainable destination. In order to obtain purer precursors, it was chosen to produce metacaulinite manually, the collected kaolinite clay was calcined at a temperature of 750 ° C for 4 hours, using active silica, deionized water and sodium hydroxide as the alkaline activator. Fluorescence and x-ray diffraction techniques were used for the chemical and mineralogical characterization of kaolinite and metacaulinite and through the simple compression strength test the mechanical performance of the specimens was obtained. The mechanical results reached 45 MPA in 100% substitution and also indicated that proportions less than 50% are not feasible because they reduce the resistance. Regarding the physical properties of the mixture, the results show that the geopolymer mortars produced in the present work resemble the geopolymer mortars studied in other researches. In view of this, it is concluded that the incorporation of bottom ash for the production of geopolymeric mortars makes the material technically compatible with conventional cements materials.

Key words: Geopolymer mortar, metakaolin, Bottom ash, sustainability

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química da metacaulinita.....	25
Tabela 2: Composição química da cinza de fundo.....	27
Tabela 3: Variações e fatores adotados.....	29
Tabela 4: Matriz e respostas médias por amostra.....	30
Tabela 5: Análise de Variância.....	31
Tabela 6: Dosagem ideal indicada pelo experimento	33
Tabela 7: Esquema de ensaios realizados e seus objetivos.....	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo conceitual de geopolimerização.....	14
Figura 2: Redes Tetraédricas de Si e Al.....	15
Figura 3: Fluxograma do processo para geração de cinzas.....	17
Figura 4: Etapas de atividades desse estudo.....	21
Figura 5: Esquema de materiais utilizados no experimento.....	22
Figura 6: Mapa geológico e localização do ponto de coleta.....	23
Figura 7: Efeito da calcinação na cor da argila.....	24
Figura 8: Metacaulinita de Novo Airão.....	24
Figura 9: Banho maria utilizado.....	26
Figura 10: Cinza de fundo oriunda de olaria.....	26
Figura 11: Agregado miúdo utilizado.....	28
Figura 12: Delineamento experimental.....	29
Figura 13: Gráfico resposta de melhor dosagem 2D.....	32
Figura 14: Gráfico resposta de melhor dosagem 3D.....	32
Figura 15: Separação dos materiais secos.....	34
Figura 16: Precursor líquido.....	35
Figura 17: Misturador de eixo vertical.....	35
Figura 18: Esquema de mistura do geopolímero.....	36
Figura 19: Esquema de mistura da argamassa.....	36
Figura 20: Moldes cúbicos.....	37
Figura 21: Vibração dos Cps.....	37
Figura 22: Cura dos Cps em temperatura ambiente.....	38
Figura 23: Espectômetro utilizado.....	40
Figura 24: Difrátômetro.....	41

Figura 25: Equipamento utilizado nas análises térmicas.....	42
Figura 26: Aparelho de vicat.....	43
Figura 27: Mesa de abatimento.....	44
Figura 28: Prensa hidráulica.....	45
Figura 29: Curvas de TG e DSC.....	66
Figura 30: Difratoograma da argila.....	67
Figura 31: Difratoograma da cinza de fundo.....	68
Figura 32: Difratoograma do geopolimero.....	69
Figura 33: Difratoograma da argamassa geopolimérica.....	69
Figura 34: Gráfico de massa específica.....	70

LISTA DE ABREVIATURA

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Testes e Materiais)

Si – Sílica

Al- Alumina

NaOH – Hidróxido de Sódio

CaO- Óxido de Cálcio

°C – Graus Celsius

γ – Massa específica

g – Grama

h – Hora

MKL – Metacaulinita

CF – Cinza de Fundo

AG – Argamassa Geopolimérica

GEO - Geopolímero

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

mm – Milímetros

min – Minutos

μ – Micro

TG – Termogravimetria

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Geopolímero.....	13
1.2. Cinza de fundo.....	16
1.3. Argamassa geopolimérica.....	18
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
2.1. Materiais.....	22
2.2. Delineamento experimental e análise estatística.....	28
2.3. Determinação da dosagem ótima.....	29
2.4. Síntese da argamassa geopolimérica.....	34
2.5. Técnicas de caracterização.....	39
2.5.1 Fluorescência de raios X.....	40
2.5.2 Difração de raios X.....	40
2.5.3 Análises térmicas.....	41
2.5.4 Tempo de Pega.....	42
2.5.5 Absorção de água.....	43
2.5.6 Consistência de argamassa.....	44
2.5.7 Resistência a compressão.....	44
3 ARTIGO 1.....	46
4 RESULTADOS COMPLEMENTARES.....	65
4.1. Caracterização da metacaulinita.....	65
4.2. Caracterização da cinza de fundo.....	68
4.3. Caracterização da argamassa.....	68
4.3.1. Massa específica da argamassa.....	70
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	71
6. REFERÊNCIAS.....	73

1. INTRODUÇÃO

1.1 Geopolímero

A forte preocupação ambiental incidente vem se mostrando como uma das principais motivações para a busca de materiais alternativos, sustentáveis, que reduzam o consumo de energia e apresentem baixo custo produtivo. Isso porque a produção intensa de cimento Portland é responsável por cerca de 8% de toda a emissão de CO₂ para a atmosfera, além de consumir grande energia (FAN et al., 2018; İLKENTAPAR et al., 2017; PAN; NAN; KAI, 2013; TONIOLO; BOCCACCINI, 2017; TOPÇU; TOPRAK; UYGUNOĞLU, 2014).

Os geopolímeros, polímeros inorgânicos ou geocimentos como também é conhecido, são termos usuais para denominar uma nova classe de materiais verdes, estes são comumente denotados como materiais inovadores e sofisticados, pois possui grande potencial de utilização, devido ao seu vasto potencial como material alternativo ao cimento (DAVIDOVITS, 2013; KAYA; SOYER-UZUN, 2016; PELISSER et al., 2013; SARKAR; DANA; DAS, 2015a).

A síntese desse novo material se dá por meio de uma reação química denominada geopolimerização representada esquematicamente na figura 1, é uma reação química semelhante à cadeia polimérica orgânica que gera uma cadeia alumina-sílica com propriedade de ligação. Na geopolimerização ocorre a mistura de um precursor sólido, ou seja, um aluminossilicato, com uma solução ativadora de silicato ou hidróxido alcalino em temperatura ambiente ou ligeiramente alta. O desempenho das propriedades dos geopolímeros depende diretamente da natureza e concentração do ativador (K ou Na), temperatura de cura, umidade e pressão (ARENAS et al., 2017; GLID et al., 2017; İLKENTAPAR et al., 2017; LONGHI et al., 2016; PROVIS, 2014; TOPÇU; TOPRAK; UYGUNOĞLU, 2014).

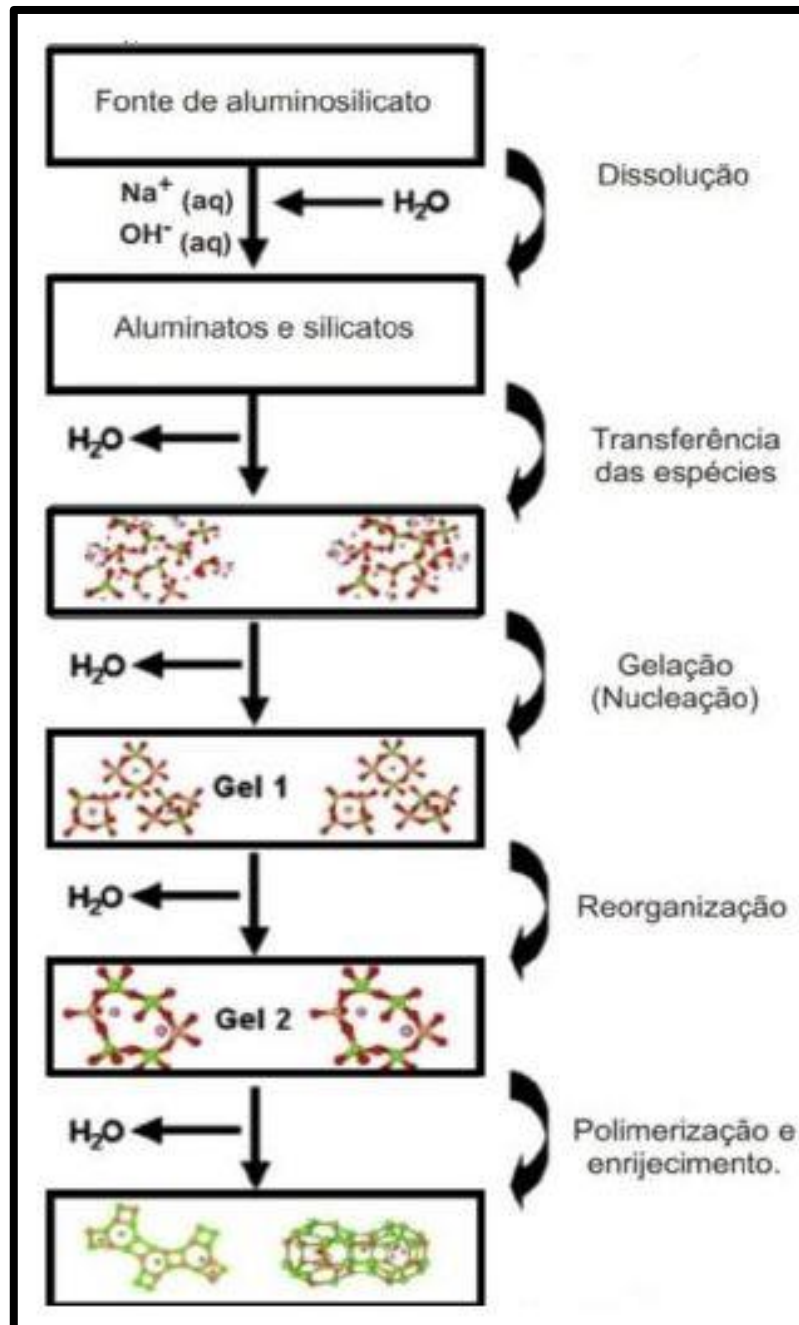


Figura 1: Modelo Conceitual de Geopolimerização.

Fonte: Adaptado Ramos (2017)

O fim da reação química é cancelada pelo fenômeno denominado polimerização (RAMOS, 2017), devido ao NaOH, o PH é elevado, o que gerou uma solução saturada de Si e Al e como resultado disso deu-se a formação de gel $N - A - S - H^8$, conforme mostra a figura 2.

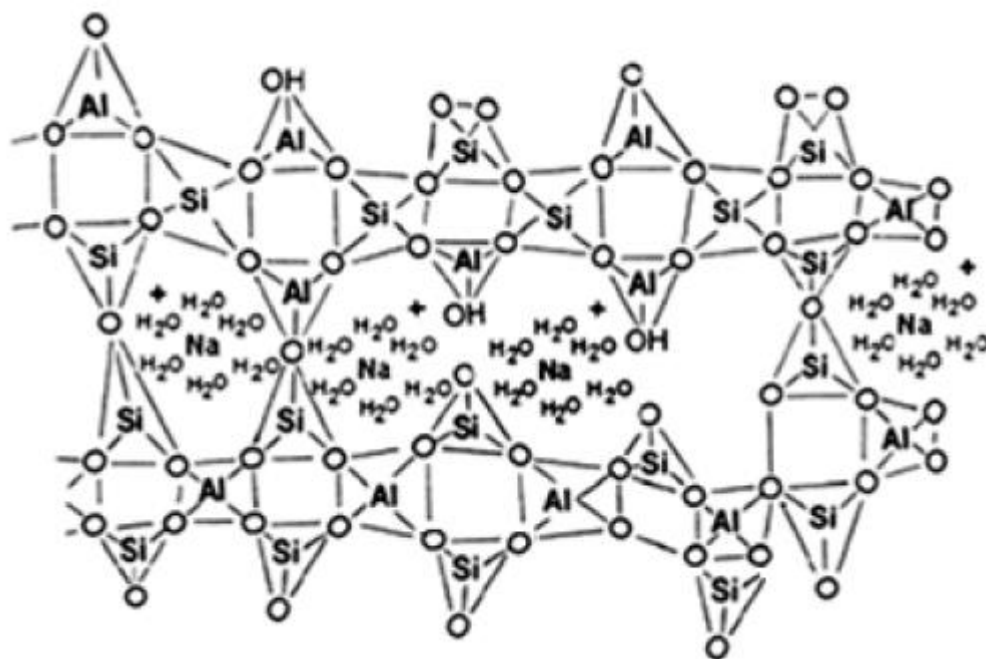


Figura 2: Redes Tetraédricas de Si e Al formadas por policondensação.

Fonte: Ramos (2017)

Os geopolímeros apresentam enorme potencial como fonte de produtos com amplo campo de aplicações, principalmente na área da construção onde competem significativamente com os produtos à base de cimento, pois trazem vantagens plausíveis, tais como, alta resistência inicial, baixa permeabilidade, excelente resistência a corrosão, durabilidade, baixo encolhimento, boa resistência ao ácido e ao fogo, o que os torna semelhantes aos materiais cimentícios (ARENAS et al., 2017; BENCARDINO; CONDELLO; ASHOUR, 2017; FAN et al., 2018; KARAKOÇ et al., 2016).

Os usos do geopolímero em processos construtivos vão desde a construção e reabilitação de estruturas até sistema de compósitos de reforço. Embora a crise do mundo da construção afete tanto o uso de cimento como o uso de geopolímeros, a quantidade e disposição de materiais utilizados na síntese desse segundo é superior a do que no cimento comum (ARENAS et al., 2017; BENCARDINO; CONDELLO; ASHOUR, 2017; LIU et al., 2013).

Há uma diversidade de materiais que são comumente utilizados na produção de geopolímeros, que geralmente apresentam baixo custo como é o caso das argilas cauliníticas que se apresentam em abundância em diversas regiões ou podem ser

ate resíduos industriais como é o caso das cinzas volantes, escória de forno, cinza de fundo, entre outros (LIU et al., 2016; KARAKOÇ et al., 2015; BENCARDINO et al., 2016).

Além do que, os geopolímeros permitem em sua composição mineral, materiais que não apresentem elevado grau de pureza, desde que tenham sílica e alumina em sua composição de forma expressiva, o que possibilita o uso de uma gama de materiais que se apresentam nessas condições (REDDY; DINAKAR; RAO, 2016; SUKMAK; HORPIBULSUK; SHEN, 2013; YAN et al., 2015).

Dentre os insumos com maior potencial de aplicação destacam-se o caulim e as cinzas volantes e de fundo (ARENAS et al., 2017; DOUIRI et al., 2017; RAMASAMY et al., 2015). Estudos feitos mostram que no caso das cinzas há possibilidade de aplicação tanto na síntese do geopolímero como pode também ser usado na substituição do agregado miúdo, tanto na síntese de argamassa como na síntese de concretos geopoliméricos, o que gera grandes possibilidades de reuso desses resíduos.

1.2 Cinza de fundo

Uma das principais formas de obter materiais verdes e baratos é empregar resíduos industriais e subprodutos na fabricação de cimentos e aglomerantes. Relacionado a isso, observa-se que uma enorme quantidade de resíduos industriais sem destinação são produzidos em grande escala ano após anos, enquanto agregados qualificados para a produção de materiais cimentícios estão cada vez mais escassos (İL KENTAPAR et al., 2017; LIU et al., 2015;).

A geração de produtos residuais provenientes da combustão é um problema que implica tanto na saúde humana, como no meio ambiente. A cinza de fundo é um subproduto industrial que tem apresentado estes problemas, devido a produção em grande quantidade, o que gera dificuldades na eliminação tornando-se um grande problema no cenário atual (ARENAS et al., 2017; CABRERA et al., 2014; PROVIS, 2014; REDDY; DINAKAR; RAO, 2016; TOPÇU; TOPRAK; UYGUNOĞLU, 2014).

No método seco, a cinza seca é transportada, colocada e compactada nos locais de disposição; enquanto no método molhado, a cinza é misturada com quantidades suficientes de água e a cinza lama é, então, transportada através de

tubulações até lagoas. Este é um dos motivos pelos quais há um grande número de pesquisas sobre a reutilização dessas cinzas, principalmente na área da construção civil, já que estas apresentam boas propriedades pozolânicas. Uma breve descrição dos processos em forma de fluxograma para as olarias que foram analisadas é apresentada na figura 3. O fluxograma mostra a geração das cinzas volante e de fundo, sendo que a segunda aqui citada é gerada em maior quantidade que a primeira e de mais fácil acesso (BAJARE; BUMANIS; UPENIECE, 2013; CABRERA et al., 2014; DEMIS; TAPALI; PAPADAKIS, 2014; LESSARD et al., 2017).



Figura 3: Fluxograma do processo para geração de Cinzas.

Fonte: Adaptado Cabrera (2013)

Sabendo que a matéria-prima básica utilizada para a síntese de geopolímeros são minerais aluminossilicatos, cujas matérias-primas devem ser transformadas em forma reativa por várias horas de aquecimento aproximadamente 750 °C antes da síntese do geopolímero. A cinza de fundo é um grande potencial, pois é um material produzido a temperaturas próximas de 800 °C com tempo de detenção de poucas

horas, sendo assim, pode ser usado como material de geopolímero sem ativação, desse modo economizando energia e tornando o seu uso eficaz e sustentável (AM; RR; SA, 2017; CABRERA et al., 2014; WIANGLOR et al., 2017).

A quantidade e a qualidade da cinza produzida em uma usina são fortemente influenciadas pelas características da mesma e pela tecnologia de combustão que é utilizada no processo. Os resultados relatados na literatura são promissores quanto ao uso de cinzas de fundo como uma substituição de agregados finos parciais ou totais para areia natural (BERRA et al., 2014; CABRERA et al., 2013; LIU et al., 2013).

Das adições residuais com maior potencialidade de uso em geopolímeros destacam-se a cinza inferior proveniente da queima de madeira na fabricação de cerâmicas vermelhas. A reutilização dessas cinza de fundo é determinada, principalmente, pelas suas propriedades químicas e físicas, das quais se destacam a grande percentagem de dióxido de silício em sua composição (CAREVIĆ; BANJAD PEČUR; ŠTIRMER, 2017; CHOWDHURY; MISHRA; SUGANYA, 2015; HINOJOSA et al., 2014; MATAKHAH et al., 2016; SINGH; SIDDIQUE, 2015).

1.3 Argamassa geopolimérica

Atualmente muitos materiais geopoliméricos vêm ganhando espaço no setor da construção civil, principalmente pelo fato de que, para esse âmbito é necessário materiais com propriedades específicas como rigidez, força, resistência, durabilidade entre outras características (LOGESH KUMAR; REVATHI, 2016). Um grande esforço em pesquisas científicas vem sendo feito a fim de utilizar os geopolímeros em diferentes aplicações, como concreto, argamassas e compósitos. (GÖRHAN; ASLANER; ŞINIK, 2016).

A argamassa de cimento é um material de reparo comumente usado, a viabilidade da argamassa geopolimérica, como substituto promissor da argamassa de cimento, tem sido amplamente discutida na literatura, autores relatam que o ativador alcalino do geopolímero apresenta forte ligação aos agregados finos usados nas argamassas (CHI; HUANG, 2013; ZHANG et al., 2016).

A argamassa geopolimérica produzida com mais de um material como precursor sólido em sua misturada está produzindo melhor resistência do que as argamassas geopoliméricas feitas com fonte única, por outro lado, alguns estudos concluíram que as cinzas possuem propriedades pozolíticas e cimentícias. E o teor de cálcio presente nessas cinzas tem influência significativa sobre as propriedades da mistura fresca e também nas propriedades do produto final endurecido (LI et al., 2013; LOGESH KUMAR; REVATHI, 2016; WONGSA et al., 2018).

Dentro dessa linha, muitos trabalhos sobre argamassas geopoliméricas com uso de geopolímeros a base de metacaulinita/cinzas vem sendo desenvolvidos. Esses materiais têm apresentado como propriedade mais notória uma alta de resistência inicial, tornando-o aplicável em diversas etapas construtivas (LI et al., 2013; PELISSER et al., 2013).

Por outro lado, estudos afirmam que existem poucas informações na literatura sobre sistemas de metacaulinita e cinza de fundo. Desse modo, como um esforço de pesquisa sobre o desenvolvimento de materiais verdes em engenharia civil, este trabalho descreve um estudo experimental da síntese uma argamassa geopolimérica, que tem como base o geopolímero de metacaulinita e como material de enchimento a cinza de fundo em substituição parcial ao agregado miúdo, tornando a esse novo material altamente sustentável e tecnicamente compatível com os demais materiais usuais no mercado atual.

Nesta perspectiva, o presente trabalho tem como objetivo geral sintetizar e caracterizar uma argamassa geopolimérica a base de metacaulinita e cinza de fundo. Para tanto se fez necessário a realização dos seguintes objetivos específicos:

Beneficiar e caracterizar os materiais precursores;

- Formular dosagem de geopolímeros a partir do ensaio de resistência por meio de planejamento experimental;
- Sintetizar a argamassa geopolimérica com base na dosagem ideal encontrada.
- Avaliar as propriedades da argamassa geopolimérica desenvolvida;

Desse modo, o trabalho aqui exposto está estruturado nos seguintes capítulos:

No capítulo 1 foi apresentada a introdução contendo uma breve revisão bibliográfica do tema.

O capítulo 2 traz a descrição de forma sucinta dos procedimentos metodológicos realizados neste trabalho, principalmente os detalhes técnicos não expressos no artigo científico que constitui os capítulos posteriores.

O capítulo 3 apresenta o artigo 1 desta dissertação, que aborda os estudos preliminares desta pesquisa, trazendo a síntese e caracterização de uma argamassa geopolimérica a base de metacaulinita e cinza de fundo, onde faz-se estudos sobre a substituição da areia de rio pela cinza de fundo em proporções variadas, identificando quais suas características mecânicas e de transportes, fazendo uma análise sobre a viabilidade de aplicações para estes materiais.

O capítulo 4 traz os resultados complementares da pesquisa e também de forma breve apresenta registros detalhados dos procedimentos usados nos ensaios mecânicos e físicos e expostos no artigo.

Por último no capítulo 5, são discorridas as conclusões e sugestões para próximas pesquisas, apresentadas pelo autor, de forma a integrar os capítulos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais, métodos e equipamentos usados para o desenvolvimento da argamassa geopolimérica a base de metacaulinita e cinza de fundo.

Para tanto, organizou-se um planejamento metodológico composto por seis etapas seqüenciadas cronologicamente com atividades e experimentos já realizados e a serem realizados. Conforme está exposto resumidamente na figura 4 a seguir.



Figura 4 – Etapas de atividades deste estudo.

A realização do presente estudo é dividida em duas fases em função dos materiais precursores dos geopolímeros. A primeira etapa visa determinar uma dosagem ideal para geopolímeros à base da argila caulínica da região, e a segunda etapa objetiva a aplicabilidade desse material, adotando a dosagem ideal, corrigindo parâmetros físicos e químicos para sintetizar uma argamassa geopolimérica a partir de metacaulinita e cinza de fundo.

2.1 Materiais

Os materiais utilizados para síntese do geopolímero à base de metacaulinita e para a síntese da argamassa geopolimérica, estão reunidos na Figura 5.

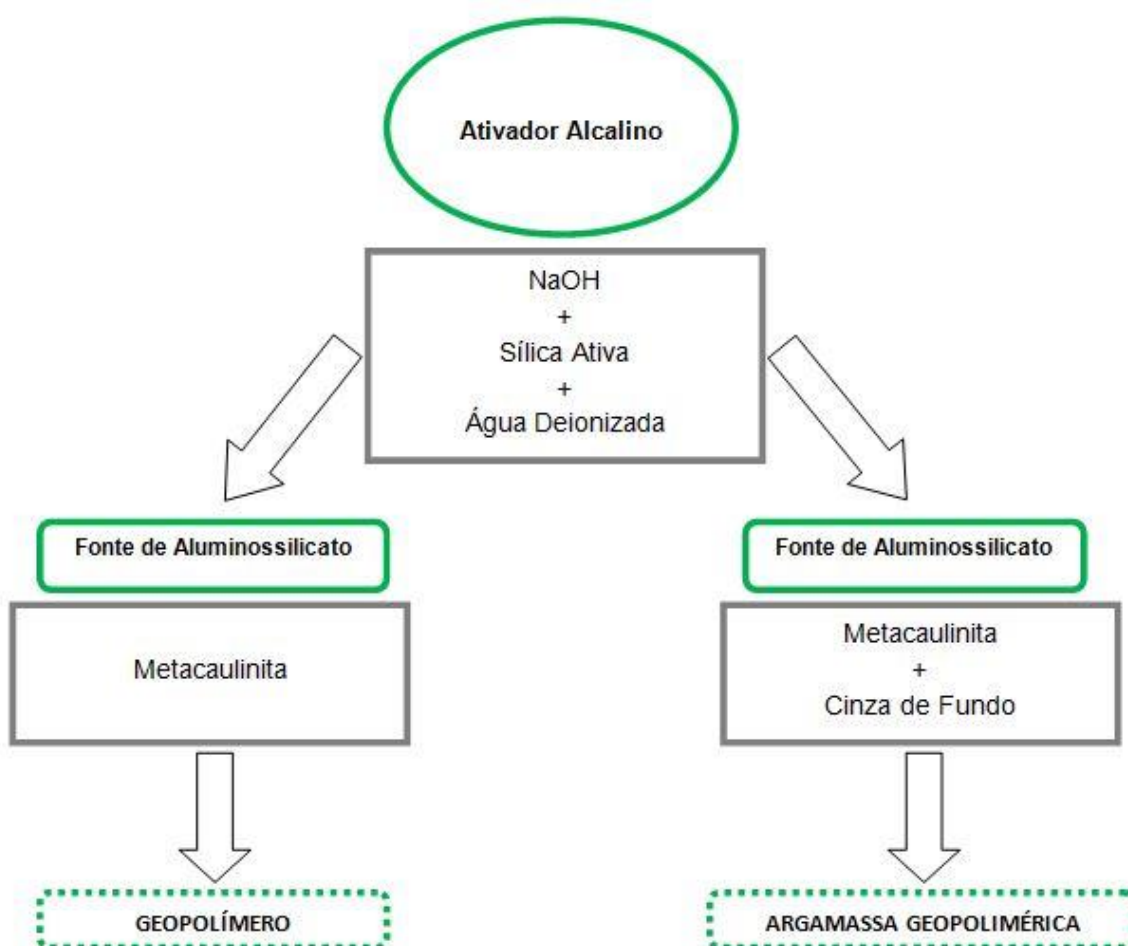


Figura 5 – Esquema de Materiais utilizados no experimento.

A argila caulínica utilizada no presente estudo é proveniente do município de Novo Airão, que fica a 47 quilômetros da cidade de Manaus no estado do Amazonas, cujo as coordenadas são: (3°9'42.4"S 60°42'28.6"W), conforme mostra o mapa de localização e geologia da área na figura 6

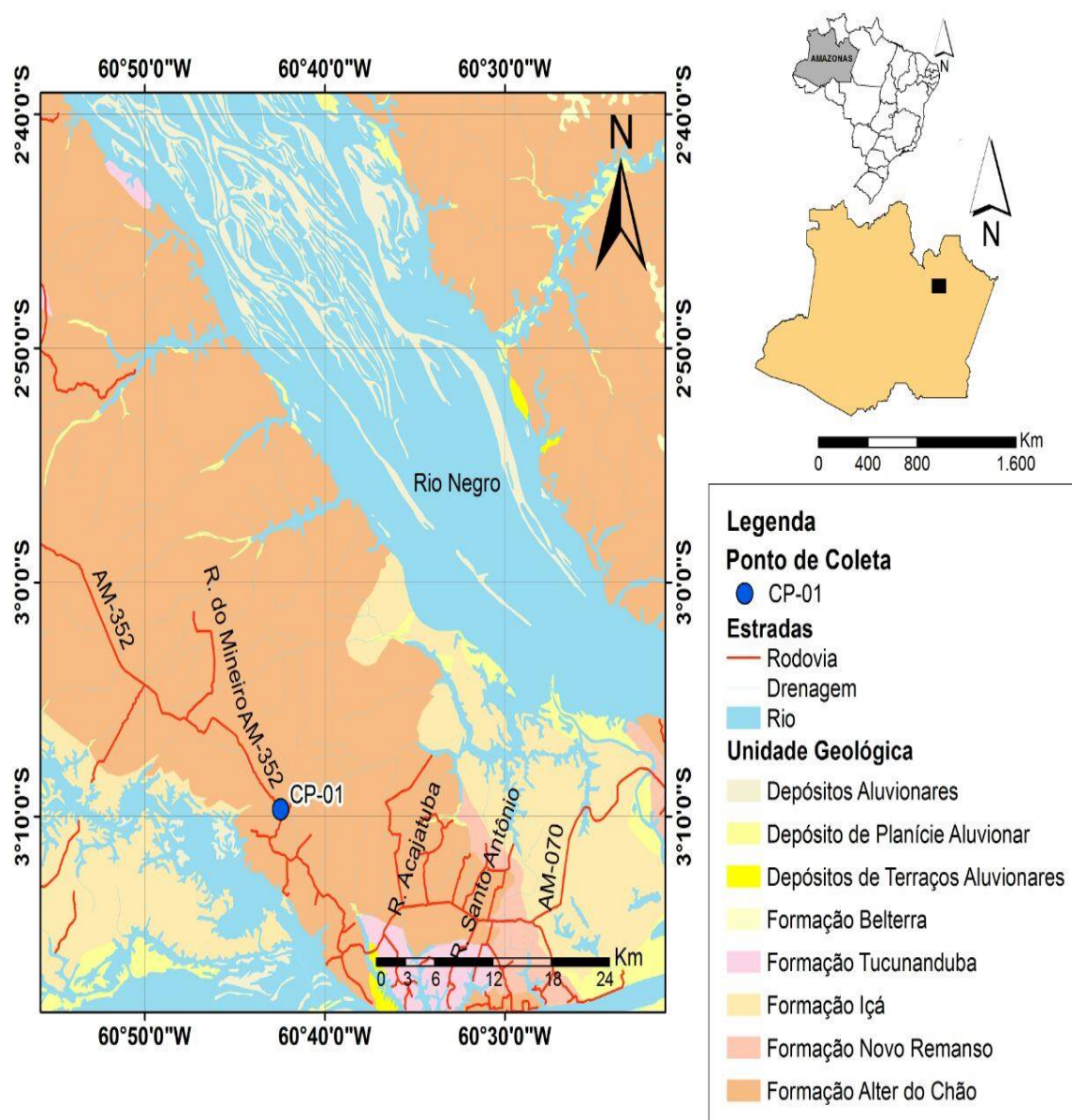


Figura 6 – Mapa geológico e localização do ponto de coleta da argila caulínica no estado do Amazonas.

A obtenção da metacaulinita ocorreu mediante calcinação do caulim (DAVIDOVITS, 2013), onde ocorrem diversas mudanças referentes a coloração e estrutura química, a alteração de coloração causada pela calcinação pode ser vista nas figuras 7 e 8.



Figura 7 – Efeito da calcinação na cor das argilas.



Figura 8 – Metacaulinita

As composições químicas da metacaulinita, expressas em quantidade percentual de óxidos, foram determinadas por fluorescência de raios X (FRX) e estão listados na tabela 1.

Tabela 1: Composição química (%) da metacaulinita.

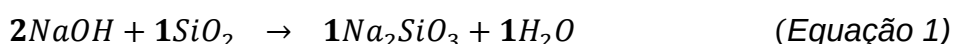
Composição química	MKL (%)
SiO ₂	52,95
Al ₂ O ₃	42,29
Fe ₂ O ₃	1,76
CaO	0,10
TiO ₂	1,12
K ₂ O	0,12
P ₂ O ₅	0,47
Outros	0,19

Através da determinação da composição química foi possível constatar que a argila apresenta grande potencial de uso para a produção do geopolímero, visto que apresentou alto teor de Al₂O₃ e SiO₂. Reddy *et al.* (2016) afirmou que a composição química da fonte aluminossilicato tem forte influência sobre a resistência apresentada pelo geopolímero, por isso a importância da análise desses óxidos.

Após a calcinação do caulim, a metacaulinita produzida passou por um ensaio de peneiramento das partículas em peneiras com diâmetro de 300 µm.

Utilizou-se o silicato de sódio como ativador alcalino, composto de NaOH, sílica ativa e água deionizada. O NaOH com 98% de pureza foi obtido na forma de escamas na região comercial da cidade de Manaus. A sílica ativa composta por 96,71% por SiO₂ na forma amorfa foi doada pela concreteira SuperMix da cidade de Porto Velho- RO e possui diâmetro máximo de 300 µm. A água deionizada foi obtida nos laboratórios de química da Universidade Federal do Amazonas.

O silicato de sódio foi preparado estequiometricamente conforme equação 1.



A dissolução foi realizada a quente, utilizando água deionizada à 90°C em banho Maria, conforme figura 9, durante um período de quinze minutos no intuito de promover maior grau de dissolução.



Figura 9 – Banho maria utilizado para a preparação do ativador alcalino

A cinza de fundo empregada nesse estudo foi coletada na fábrica de tijolos denominada: CERÂMICA RIO NEGRO no município de Iranduba (Manaus, Amazonas.)

O material representado pela Figura 10 passou por lavagem e processo de decantação para retirada do excesso de areia e matérias orgânicas. Em seguida o material foi seco em estufa à 105 °C até manutenção da massa constante, depois realizou-se a moagem mecânica em moinho de bolas por um período de três horas com frequência de 40 RPM. Por fim o material foi peneirado de modo a descartar as partículas com diâmetro maior que 150 μm .



Figura 10 – Cinza de fundo oriunda de olaria após beneficiamento

As composições químicas da cinza de fundo, expressas em quantidade percentual de óxidos, foram determinadas por Fluorescência de Raios X (FRX) e estão listados na tabela 2.

Tabela 2: Composições químicas (%) da cinza de Fundo

Composição química	Cinza de Fundo
CaO	35,17
Al ₂ O ₃	32,75
MgO	13,41
SiO ₂	7,64
K ₂ O	4,12
P ₂ O ₅	3,26
Fe ₂ O ₃	1,84
SO ₃	0,62
Outros	0,57

O agregado miúdo utilizado na preparação das misturas de argamassa foi uma areia comercial da região, de granulometria fina, passante em peneira da ABNT n° 50 – 300 µm, conforme sugerido pela literatura (ASTM, 2010a; İLKENTAPAR et al., 2017; KHANDELWAL et al., 2013; LOGESH KUMAR; REVATHI, 2016).

Singh *et al.* (2015) apresentaram um estudo sobre o uso de agregados finos em materiais cimentícios e a substituição parcial destes agregados por cinzas, foi possível perceber que além de atuar no combate à retração do material, a adição de areia fina reduziu o custo do produto final e permitiu bons resultados quando usado com cinzas variadas.

O uso de agregados finos em sínteses de argamassas geopoliméricas é comum (PELISSER et al., 2013; WIANGLOR et al., 2017) e a partir da análise embasada em trabalhos anteriores, foi dada a escolha da areia usada, conforme mostrado na figura 11.