



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



**PLACAS CIMENTÍCIAS OBTIDAS A PARTIR DE ARGAMASSA DE
ALUMINOSSILICATOS**

WELLEM ANTÔNIO PRESTES CAMPOS

MANAUS
2016



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



**PLACAS CIMENTÍCIAS OBTIDAS A PARTIR DE ARGAMASSA DE
ALUMINOSSILICATOS**

WELLEM ANTÔNIO PRESTES CAMPOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil - Área de Concentração: Materiais e Componentes de Construção.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira

MANAUS
2016

Ficha Catalográfica

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

C198p Campos, Wellem Antônio Prestes
Placas cimenticias obtidas a partir de argamassa de aluminossilicatos / Wellem Antônio Prestes Campos. 2016
53 f.: il. color; 31 cm.

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

1. Argila caulinitica. 2. Metacaulim. 3. agregado. 4. Aluminossilicatos. I. Vieira, Raimundo Kennedy II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

WELLEM ANTÔNIO PRESTES CAMPOS

**PLACAS CIMENTÍCIAS OBTIDAS A PARTIR DE ARGAMASSA DE
ALUMINOSSILICATOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil - Área de Concentração: Materiais e Componentes de Construção.

Aprovado em 11 de agosto de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira, Presidente.
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo, Membro.
Universidade Federal do Amazonas

Profa. Dra. Valdete Santos de Araújo, Membro Externo.
Universidade Estadual do Amazonas

DEDICATÓRIA

A Deus, por estar sempre ao meu lado.

Aos meus pais, Raimunda Campos Prestes e Raimundo Pereira Prestes (*In memoriam*) que iluminam o meu caminho e tornaram possível essa caminhada.

Aos meus filhos Ítalo e Yasmin, pelo amor e carinho.

A minha namorada Mary Gonçalves, pelo incentivo e apoio.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado sabedoria, força, coragem e perseverança para concluir o trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira, pela sua dedicada e competente orientação durante a realização do trabalho, além de sua amizade e companheirismo.

A Prof^a. Dra. Adalena Kennedy Vieira, por transmitir seus conhecimentos com muita sabedoria, e dedicar parte de seu tempo na concretização desse trabalho, e também pela sua amizade.

Ao Prof. Hércules Jesus de Carvalho Borges (*In memoriam*) pelo incentivo e apoio dado para realização deste mestrado.

Aos meus alunos: Gabriel Almeida Nunes, Elizeu Otto Junior, Leonardo Carvalhalves e Leandro Brasil Reis, pela dedicação e contribuição de forma prática nas realizações dos experimentos.

A química Aline Gabrielle Martinez, que me ajudou nos experimentos durante o período que estive em Manaus – AM.

Ao técnico e químico industrial Rosinaldo Rabelo Aparício, do Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, por todo apoio prestado durante a realização da pesquisa.

A técnica e engenheira florestal Hinara Cordeiro Costa, do laboratório de materiais da Faculdade de Rondônia – FARO, que sempre esteve a disposição quando solicitada à prestar apoio para realização da pesquisa.

Ao técnico Gilberto Gil Abreu, da empresa BETONTECH Controle Tecnológico de Solo por todo apoio prestado durante a realização dos ensaios mecânicos.

A Faculdade de Rondônia – FARO, por prestar apoio técnico, ceder o laboratório de materiais, disponibilizar materiais e equipamentos para realização da pesquisa.

A empresa BETONTECH Controle Tecnológico de Solo, por ceder seus técnicos e o laboratório para realização dos ensaios de resistência à compressão e de resistência à flexão em quatro pontos, em especial ao Engenheiro Civil Luiz Felipe Bastos Àvila, por todo apoio prestado.

Por fim, agradeço aos meus familiares e a todos que, direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse concluído.

Muito obrigado!

“Nunca desista de seus objetivos mesmo que esses pareçam impossíveis, a próxima tentativa pode ser a vitoriosa.”

Albert Einstein

RESUMO

As consequências negativas provocadas ao meio ambiente através da emissão de CO₂, tem feito com que nos últimos anos pesquisas sejam desenvolvidas pela busca de novos materiais, dentre esses existem o metacaulim, usado como material pozolânico para produção de aluminossilicatos. Este trabalho objetivou obter uma argamassa de aluminossilicatos ativado por meio de solução alcalina, utilizando o metacaulim como material de substituição do cimento Portland. Para obtenção da placa de aluminossilicatos foi utilizada argila caulinitica retida na peneira ABNT 200 (0,074 mm) e calcinada na temperatura de 800 °C durante 2 horas, sílica ativa e Hidróxido de sódio. Para obtenção da argamassa de cimento Portland foi utilizado o cimento CP IV-32 e como agregado miúdo uma areia lavada fina retida na peneira ABNT 200 (0,074 mm). A argila caulinitica e o metacaulim foram caracterizados através de ensaios químicos e mineralógicos, utilizando técnicas de fluorescência e difração de raio x, e através de ensaios físicos utilizando o frasco volumétrico “Le Chatelier e o permeabilímetro de Blaine. O desempenho mecânico dos corpos de prova cilíndricos foi obtido em ensaios de resistência à compressão simples, e o das placas de aluminossilicatos e cimento Portland foi obtido em ensaios de resistência à flexão em quatro pontos. Os resultados possibilitaram avaliar as características físico-químicas e mineralógica da matéria prima dos aluminossilicatos, possibilitaram também uma avaliação da resistência mecânica das placas, onde foi verificado que a placa de cimento Portland apresentou tensão máxima média à flexão superior de 5,3% em relação a da placa de aluminossilicatos.

Palavras-chave: Argila caulinitica. Metacaulim. Agregado. Aluminossilicatos.

ABSTRACT

The negative effects caused to the environment by CO₂ emissions has provoked, in the last years, the development of researchs for new materials, among these the metakaolin, used as pozzolanic material for production of aluminosilicate. This study aimed to get an aluminosilicate mortar activated by alkaline solution using metakaolin as replacement material for Portland cement. To obtain aluminosilicate board was used kaolinite clay retained in the sieve ABNT 200 (0.074 mm) and calcined at a temperature of 800° C for 2 hours, silica fume and sodium hydroxide. To obtain the Portland cement mortar was used CP IV-32 and as fine aggregate it was used washed sand retained at the sieve ABNT 200 (0.074 mm). The kaolinite clay and metakaolin were characterized by chemical and mineralogical assays using fluorescence techniques and x-ray diffraction, and through physical testing using the volumetric flask "Le Chatelier" and Blaine air permeability apparatus. The mechanical performance of the cylindrical specimens was obtained in strength tests to simple compression, and the aluminosilicate boards and Portland cement was obtained in flexural strength tests on four points. The results enabled to evaluate the physicochemical and mineralogical characteristics of the raw material of aluminosilicate and also allowed an evaluation of the mechanical resistance plates, where it was observed that Portland cement plate showed maximum average strain to the higher flexion of 5.3 % in relation of aluminosilicates of the plate.

Keywords: kaolinite clay. Metakaolin. Aggregate. Aluminosilicate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da estrutura química do geopolímero	19
Figura 2 - Modelo conceitual para geopolimerização, desde a desestruturação do metacaulim através da ativação com solução alcalina até a formação da nova estrutura.	20
Figura 3 - Fluxograma das etapas desenvolvidas no trabalho experimental	26
Figura 4 - Materiais utilizados na obtenção da argamassa de aluminossilicato	27
Figura 5 - Localização da jazida de argila caulinitica	28
Figura 6 - Materiais utilizados na obtenção da argamassa de cimento Portland.....	29
Figura 7 - Equipamentos utilizados nas etapas do processo de calcinação do caulim	30
Figura 8 - Amassamento e homogeneização da argamassa.....	33
Figura 9 - Moldagem dos corpos de prova	34
Figura 10 - Equipamentos e obtenção da argamassa e das placas de aluminossilicatos	35
Figura 11 - Obtenção da argamassa e das placas de cimento Portland	36
Figura 12 - Rompimento do corpo de prova	37
Figura 13 - Rompimento das placas de aluminossilicatos.....	38
Figura 14 - Rompimento das placas de cimento Portland.....	39
Figura 15 - Difratoograma de raios-x da argila caulinitica	41
Figura 16 - Difratoograma de raios-x da metacaulim	42
Figura 17 - Gráfico comparativo da resistência a compressão dos corpos de prova curados à temperatura ambiente em função da concentração molar	44
Figura 18 - Gráfico comparativo dos corpos de prova curados à temperatura ambiente e estufa para 28 dias.....	44
Figura 19 - Gráfico comparativo das tensões máximas das placas de aluminossilicatos e cimento Portland curados aos 28 dias.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exigências químicas dos materiais pozolânicos.....	21
Tabela 2 - Exigências físicas dos materiais pozolânicos	22
Tabela 3 - Composição físico-química da sílica ativa	28
Tabela 4 - Composição das soluções alcalinas	32
Tabela 5 - Composição das amostras	33
Tabela 6 - Composição dos materiais referentes as placas.....	34
Tabela 7 - Composição dos materiais referentes as placas.....	35
Tabela 8 - Composição química da argila caulinitica e do metacaulim	40
Tabela 9 - Proporções dos óxidos presentes na argila caulinitica e no metacaulim.....	40
Tabela 10 - Massa específica e superfície específica da argila caulinitica, do metacaulim e do cimento Portland.....	43
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de resistência a compressão.....	43
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de resistência a flexão em quatro pontos.....	45

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio (Alumina)
B.E.T	Brunauer Emmett Teller
CP IV	Cimento Portland pozolânico
Ca	Cálcio
CaO	Óxido de cálcio
C	Carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CPAS	Corpo de prova de aluminossilicato
cm ²	Centímetro ao quadrado
cm ³	Centímetro ao cubo
DRX	Difração de raios – X
FT	Faculdade de Tecnologia
FRX	Fluorescência de raios - X
Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro (hematita)
g	Gramas
H ₂ O	Água
K	Potássio
KOH	Hidróxido de potássio
K ₂ O	Óxido de potássio
Mpa	MegaPascal
MgO	Óxido de magnésio
µm	Micrômetro
mm	Milímetro
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NaOH	Hidróxido de sódio
Na ₂ O	Óxido de sódio
N	Newton

PAS	Placa de aluminossilicato
PCP	Placa de cimento Portland
P ₂ O ₅	Óxido de fósforo
P	Fósforo
Si	Silício
SiO ₂	Óxido de silício
Ti	Titânio
TiO ₂	Óxido de titânio
UFAM	Universidade Federal do Amazonas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Geral	16
1.2.2 Específicos	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 BREVE HISTÓRICO	18
2.2 ALUMINOSSILICATOS	18
2.2.1 Polímeros Inorgânicos	18
2.2.2 Geopolimerização	20
2.3 MATERIAL POZOLÂNICO.....	21
2.4 ARGILOMINERAL.....	22
2.5 CALCINAÇÃO.....	23
2.6 ATIVAÇÃO E pH DA SOLUÇÃO ALCALINA.....	23
2.7 FINURA DA POZOLÂNICA.....	24
2.8 SÍLICA ATIVA.....	24
2.9 CIMENTO PORTLAND	25
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	26
3.1 MATERIAIS	27
3.2 MÉTODOS.....	29
3.2.1 Obtenção do metacaulim a partir da calcinação da argila caulinitica	29
3.2.2 Caracterização físico-química da argila caulinitica e da metacaulim	31
3.2.3 Preparação das amostras	32
3.2.4 Caracterização dos aluminossilicatos	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 CARACTERIZAÇÃO POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X	39
4.2 CARACTERIZAÇÃO POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	41
4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ARGILA CAULINITICA E DO METACAULIM	42
4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS CORPOS DE PROVA E DAS PLACAS... 43	
4.4.1 Caracterização mecânica dos corpos de prova cilíndricos	43
4.4.2 Caracterização mecânica das placas retangulares	45
5 CONCLUSÕES	47
6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	48
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1 INTRODUÇÃO

A construção de edificações empregando a mistura de pozolana natural com cal, eram utilizadas desde a época do império romano até o descobrimento do cimento Portland em 1824 pelo químico britânico Joseph Aspdin. A partir de então, a utilização da mistura ficou esquecida. Com o desenvolvimento industrial e em parte pela produção industrial de cimento Portland, nos últimos anos, os excessos de agressões ao ecossistema vem atingindo vários pontos do planeta causando grandes desastres ambientais. Para Torgal, (2010) o cimento Portland é o material de construção civil mais amplamente utilizado, gerando grande influência no desenvolvimento da economia, porém, para Mehta (2008); Pangdaeng *et al.* (2014), a produção de cimento Portland é responsável por 5% da emissão de gás carbônico (CO₂) para atmosfera, contribuindo em grande parte para o aumento do efeito estufa.

A produção de uma tonelada de clínquer produz 0,95 toneladas de CO₂ (MAURY, 2012). Os lançamentos anuais de CO₂ provenientes da fabricação de cimento chegam a quase 3 bilhões de toneladas por ano em todo o mundo, para essa produção é necessária uma grande quantidade de energia e de recursos naturais não renováveis (VASSALOS, 2013). De acordo com Goni *et al.*, (2014), os materiais pozolânicos são energeticamente mais econômicos que o clínquer do cimento Portland. Para fabricação do cimento Portland as matérias primas devem ser aquecidas até 1600 °C por 8 horas, chegando a emitir uma grande quantidade de CO₂, enquanto que para fabricação de produtos constituídos de aluminossilicatos, as matérias primas são aquecidas até 850 °C por 2 horas, emitindo apenas vapor de água, resultando em até 80% a menos na emissão de gases poluentes (DAVIDOVITS, 1991; GONI *et al.*, (2014).

Esses fatos e a necessidade de diminuir a poluição ambiental, tem feito com que novas pesquisas tecnológicas pela busca de novos produtos sejam desenvolvidas (VASSALOS, 2013). Um material que pode ser considerado ecologicamente correto, reduz o impacto ambiental, e já existe no mercado, são os conhecidos como geopolímero, que apresentam características químicas, físicas e mecânicas compatíveis com o cimento Portland (PALOMO

et al., 2009; VALENCIA, 2014). O termo “geopolímero ou polissialato” foi criado pelo professor Joseph Davidovits, em 1978, para designar as propriedades químicas do polímero inorgânico baseado em aluminossilicatos (LOWRY & KRIVEN, 2010).

As argilas mais utilizadas para a produção de pozolanas são as caulinitas, as montmorilonitas e as ilitas, porém, a caulinita é a mais utilizada por ser encontrada com maior facilidade e abundância na crosta terrestre, e por apresentar qualidade superior relativa às outras (SANTOS, 1992 & FERNANDEZ *et al.*, 2012). O metacaulim ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), é uma pozolana amorfa rica em alumina e sílica (OLIVEIRA & BARBOSA, 2006; WARNER, 2012), para Stevenson (2016), é obtida a partir da calcinação da argila caulinitica em temperaturas controladas através do processo de desidroxilação, tornando a argila mais reativa e resultando em desarranjo de sua estrutura. O metacaulim, é a matéria prima utilizada na fabricação de produtos constituídos de aluminossilicatos (STEVENSON, 2016), sendo menos agressiva ao meio ambiente e ativada por uma solução alcalina.

Essas vantagens promovem a busca para assimilar a química desse material e incentivar seu uso. Neste contexto, este trabalho realiza uma pesquisa visando obter uma argamassa de aluminossilicato para utilização na preparação de placas cimentícias, utilizando como matéria prima um caulim calcinado oriundo do município de Presidente Figueiredo no Estado do Amazonas, e como ativador alcalino o hidróxido de sódio. Esta pesquisa analisou também o desempenho mecânico das placas de aluminossilicatos e de cimento Portland.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O objetivo principal do trabalho é obter e caracterizar mecanicamente placas cimentícias a partir de uma argamassa com matrizes baseadas em aluminossilicatos.

1.2.2 Específicos

- Obter uma argamassa com matrizes baseada em aluminossilicatos.
- Caracterizar as propriedades físico-químicas da matéria prima utilizada para obtenção da argamassa com matrizes baseada em aluminossilicatos.
- Aplicar a argamassa com matrizes baseada em aluminossilicatos na confecção de placas.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A organização do trabalho está dividida em 6 (seis) capítulos. No primeiro capítulo, a introdução fala sobre a utilização de matérias pozolânicos na antiguidade, a importância do tema, a utilização dos materiais pozolânicos como fonte alternativa do cimento, e da motivação para a realização dos estudos. No mais, fala sobre os objetivos principais a serem alcançados. No segundo capítulo, é apresentada a fundamentação teórica, esboçando um breve histórico, partindo da antiguidade até os dias atuais, descreve também sobre definições interessantes do tema. O terceiro capítulo, apresenta o procedimento experimental adotado para a elaboração deste trabalho. No quarto capítulo, são relatados e discutidos os resultados esperados. No quinto capítulo, é apresentada a conclusão dos resultados esperados, discutidos no capítulo anterior. No sexto capítulo, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 BREVE HISTÓRICO

Os povos antigos, entre eles pode-se citar os romanos, estão entre os primeiros a empregar argamassa e concreto na construção. Segundo Vinson (2012), as pozolanas proporcionam produtos confiáveis, isso pode ser constatado através de obras antigas que se mantêm firmes até hoje.

De acordo com suas pesquisas químicas e mineralógicas, Davidovits (1994), afirma serem os blocos das pirâmides do Egito um aglomerante feito da mistura de calcário de Gizé com hidróxido de sódio, produzido no local pela mistura de cal, carbonato de sódio e água, e não de pedra calcária natural.

Atualmente pode-se pesquisar a composição de material pozolânico com emprego de técnicas mais adequadas em comparação com a época em que o cimento Portland foi descoberto (MURTA, 2008), desta forma pode-se estudar e desenvolver a composição de argamassas ativadas por solução alcalina e que possa ser produzida em grande quantidade, podendo até substituir algumas funções do cimento Portland (VINSON, 2012).

2.2 ALUMINOSSILICATOS

2.2.1 Polímeros Inorgânicos

Uma nova classe de matérias como os aluminossilicatos, onde a obtenção acontece pela polimerização de materiais naturais de origem geológica, são conhecidos como geopolímeros ou polissialatos. Para Duxson *et al.*, (2007) e Ryu, *et al.*, (2013), o termo mais adequado para nomear os geopolímeros é “polímeros inorgânicos”, em qualquer um dos casos é fundamental a ativação alcalina (DAVIDOVITS, 2005; PACHECO-TORGAL, *et al.*, 2012). Sob condições alcalina, os aluminossilicatos, são convertidos em produtos extremamente reativos devido ao processo de dissociação de diferentes tipos de silicatos e aluminatos (SILVA *et al.*, 2015).

A obtenção dos compósitos de aluminossilicatos ocorre a partir da composição de materiais sólidos composto de sílica e alumina com uma solução alcalina (SILVA *et al.*, 2015), seguido da geopolimerização a temperatura ambiente, é comum a utilização de soluções alcalinas de hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH), podendo também serem misturado com silicato de potássio ou de sódio (ROMAGMOLI *et. al.*, 2012).

Para Davidovits (2005), os polissialatos têm estrutura que parecem polímeros naturais resultantes da reação de geopolimerização onde a forma do produto final pode ser suposta como uma rocha sintética, mas que apresenta estrutura amorfa. De acordo com a razão Si/Al três estruturas tridimensionais são formadas para os geopolímeros, conforme mostra a Figuras 1.

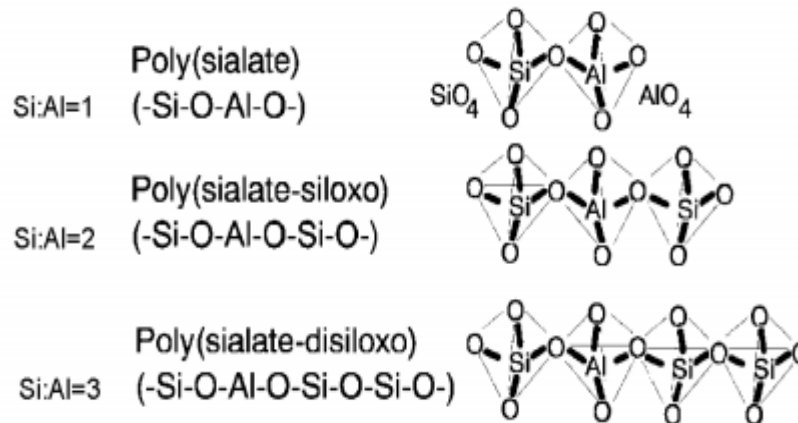


Figura 1 - Representação da estrutura química do geopolímero

Fonte: Davidovits. 2002

A carga da rede formada pelos tetraedros de silício e alumínio tem seu balanceamento ajustado quando a matriz de aluminossilicatos entram em contato com o sódio da solução alcalina (PROVIS, 2014). Segundo Phair (2002) e Bernal (2013), a resistência a compressão dos aluminossilicatos ativados com KOH é maior do que a resistência a compressão daqueles ativados com NaOH. Para este trabalho foi utilizado como ativador alcalino o hidróxido de sódio.

2.2.2 Geopolimerização

A geopolimerização, acontece através do fenômeno exotérmico, que consiste nas etapas de lixiviação, policondensação, condensação e endurecimento (PINTO, 2004; KOMNITSAS *et al.*, 2013). As propriedades da solução alcalina são de determinar a separação e promover a recombinação da estrutura do aluminossilicato, assim como a policondensação e o equilíbrio das cargas de reação do sistema (LOWRY & KRIVEN, 2010). O contato dos materiais fonte de sílica e alumina com a solução alcalina estimula a lixiviação, ou seja, provoca a separação das substância sólida, dissolvendo a pequena quantidade dos elementos Si e Al, logo após acontece a policondensação, onde o movimento livre de partículas contidas em uma solução distribuem-se uniformemente na mesma, em seguida devido a reação de condensação, ocorre a transformação da matéria, onde o polímero vai sendo constituído, formando um gel, o processo continua se reorganizando até seu endurecimento, resultando na formação de uma estrutura amorfa de aluminossilicatos, (MELO, 2011 & VASSALO, 2013), conforme mostra a Figura 2.

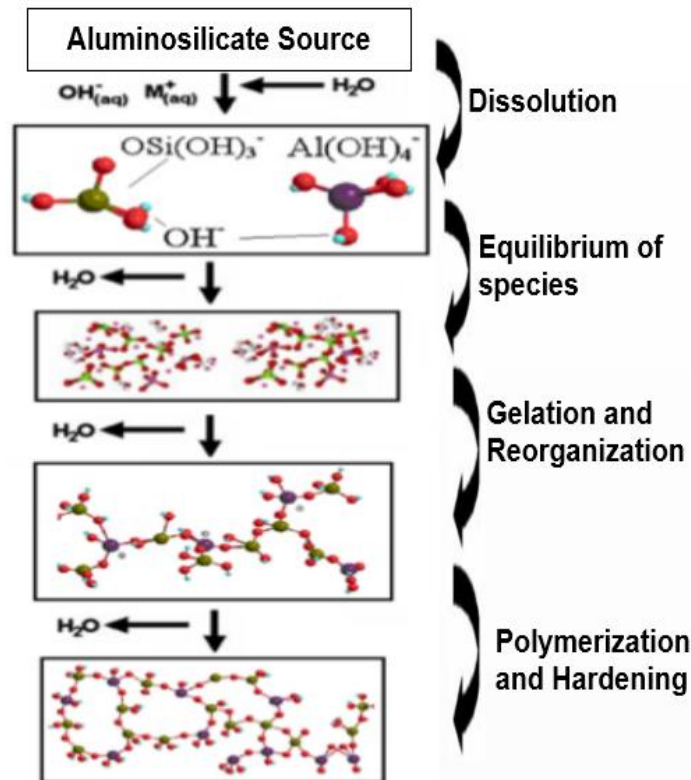


Figura 2 - Modelo conceitual para geopolimerização, desde a desestruturação da metacaulim através da ativação com solução alcalina até a formação da nova estrutura.

Fonte: DUXSON *et al.*, 2007 & YAO *et al.*, 2009 (adaptação)

Para VAN JAARVELD (2000); SANTA (2013), o tempo para a formação de um gel depende das condições de processamento da matéria prima e da composição do ativador.

2.3 MATERIAL POZOLÂNICO

A NBR 5736 (ABNT, 1991), define como pozolânicos os materiais silicosos ou silicoaluminosos que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante mais que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentícias. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992), os materiais pozolânicos são classificados em naturais, de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido ou de origem sedimentar e artificiais, provenientes de tratamento térmico (argilas calcinadas) ou resíduos agroindustriais com atividade pozolânica. Segundo ainda a NBR 12653 (ABNT, 1992), os materiais pozolânicos são divididos em três classes: N, C e F. A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam as exigências químicas e físicas para as diferentes classes descritas pela NBR 12653 (ABNT, 1992).

Tabela 1 - Exigências químicas dos materiais pozolânicos

Propriedades	Classes		
	N	C	F
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mín.	70	70	50
SO ₃ , % máx.	4	5	5
Teor de umidade, % máx.	3	3	3
Perda ao fogo, % máx.	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: NBR 12653, 1992

Tabela 2 - Exigências físicas dos materiais pozolânicos

Propriedades	Classes		
	N	C	F
Material retido na peneira 45 µm, % máx.	34	34	34
Índice de atividade pozolânica			
Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mín.	75	75	75
Com a cal aos 7 dias, em MPa.	6	6	6
Água requerida, % máx.	115	110	110

Fonte: NBR 12653, 1992

De modo geral, na classe N se enquadram tanto pozolanas naturais quanto artificiais. A argila calcinada é classificada como material pozolânico da classe N. Segundo Perná (2014), para obter o geopolímero é necessário que o material suplementar seja uma fonte de aluminossilicatos, tal como a metacaulim, para ser ativado alcalinamente. A metacaulim é a forma desidratada do argilomineral caulinita, pertencente ao grupo dos filossilicatos, constituídas essencialmente SiO_2 e Al_2O_3 (SANTA, 2013).

2.4 ARGILOMINERAL

É o resultado da alteração de diversas rochas contendo silicato de alumínio e outros minerais como quartzo, feldspatos, micas, óxidos, hidróxido de ferro e alumínio (FABBRI, 2012). São argilas compostas de silicatos de alumínio hidratados, que, segundo Santos (2012), dentre os diversos tipos de argilominerais as mais utilizadas para a produção de pozolanas são as caulinitas, montmorilonitas e as ilitas. Para Fabbri (2012), por apresentar grandes quantidades de sílica e alumina e suas propriedades físicas e químicas serem de qualidade superior relativa às outras, a caulinita é o mineral mais amplamente utilizado como matéria prima para produção da metacaulim. Para que a argila caulínica sofra alterações em suas propriedades físicas e químicas e possa desenvolver atividade pozolânica é necessário que a mesma passe por um processo de calcinação (FITOS *et. al.*, 2015 - FICHEIRO)

2.5 CALCINAÇÃO

Para Santos (2012); Perná (2014), as temperatura ideais de calcinação para que as argilas caulínicas desenvolva propriedades pozolânicas estão entre 700°C e 900 °C por 4 horas. Davidovits (1999), estabelece que as temperaturas ideais são entre 700°C e 800°C por 6 horas. Oliveira e Barbosa (2006), pesquisaram a calcinação do caulim com temperaturas variáveis de 700°C, 800°C e 900°C por um período de 2 horas. Tironi, (2014), calcinou a argila caulínica a 700°C durante 30 minutos. Segundo Fitos et. al., (2015), a metacaulim é obtida pela calcinação da argila culínica a temperatura controlada variando entre 650°C e 800°C durante 3 horas.

2.6 ATIVAÇÃO E pH DA SOLUÇÃO ALCALINA

Além dos materiais sólidos, fonte de aluminossilicato, para produzir os materiais geopoliméricos é necessária uma solução alcalina. As bases alcalinas mais utilizadas em soluções ativadoras são o NaOH e K (WALLAH, 2006 & RYU, 2013). As estruturas amorfas são transformadas em um maciço material cimentício através do processo químico de ativação alcalina (TIRONI, 2014). As espécies de aluminossilicatos ao entrar em contato com uma solução alcalina dissolvem-se, pois ocorre a lixiviação de Al_3^+ e Si_4^+ , devendo a concentração do ativador ser elevada, pois os mesmos são os responsáveis pela dissolução da sílica (GÖRHAN, 2014).

O tempo de reação, tanto inicial quanto final, pode ser alterado em função da concentração dos ativadores alcalinos (FITOS *et. al.*, 2015). Os ativadores alcalinos com maior utilização na fabricação de argamassas e concretos álcali-ativados são: Ativação por álcalis, onde utilizam hidróxidos alcalinos, ativação por sulfatos alcalinos e ativação mista (GÖRHAN, 2014). A utilização do sulfato melhora a ativação, porém os compostos alcalinos são melhores ativadores (PUERTAS, 2014). Além das variáveis que influenciam a reação, na ativação

alcalina é necessário também determinar a composição química e a finura da pozolana, o grau de cristalinidade da sílica presente na pozolana, a razão molar entre os reagentes principais e o pH da solução alcalina (SANTOS, *et al.*, 2015).

Em função da baixa solubilidade a pozolana demora a reagir quando em contato com a água pura, no entanto, na presença de água com pH alto a velocidade de reação da pozolana eleva-se, formando então compostos hidratados estáveis (HAHA, *et al.*, 2012).

A solubilidade do produto cresce na razão direta do aumento do pH para valores superiores a 10,7 (TIRONI, 2014). Para (HAHA, *et al.*, 2012), a elevação do pH para valores maiores do que 11,5 possibilitam a maior solubilidade da sílica, permitindo uma mudança significativa do C-S-H devido à modificação química das soluções porosas.

2.7 FINURA DA POZOLÂNICA

Valores elevados de finura podem melhorar a resistência mecânica, particularmente a resistência nas primeiras idades, diminuir a exsudação e a segregação, aumentar a impermeabilidade, a trabalhabilidade e a coesão (BAUER, 2011). Muitas propriedades das argamassas e concretos, bem como a velocidade de reação de ativação alcalina do material, são influenciadas diretamente pela finura da pozolana (KAKALI, 2001). O desenvolvimento das propriedades pozolânicas de argilas calcinadas depende da natureza do argilomineral, e da finura do produto final (SOURI, 2015).

2.8 SÍLICA ATIVA

É um material pulverulento constituído de partículas finas, obtida através do processo de fabricação do silício metálico ou do ferro silico, de onde é produzido o SiO, que ao sair do forno elétrico oxida-se, formando a sílica amorfa (SiO₂), sendo então captada por filtro de manga. Suas partículas têm o diâmetro médio de 0,2 µm, sendo muito menor que o diâmetro

médio de um grão de cimento. O alto teor de SiO_2 com estrutura amorfa, aliado a uma elevada finura, apresenta altíssima reatividade, proporcionando melhor desempenho em concretos e argamassas (TECNOSIL, 2016).

A sílica ativa é um material com grande propriedade pozolânica, em função de sua constituição se basicamente de sílica amorfa (SARKER, 2014). O processo de ativação do cimento é induzido por um efeito microfíler (físico) e um efeito pozolânico (químico) da sílica ativa, resultando na constituição de uma microestrutura mais densa, homogênea e uniforme (SHI *et al.*, 2015). A elevada finura da sílica ativa e o formato esférico das partículas resulta em aumento da coesão e a pouca exsudação da mistura, podendo resultar em fissuração por retração plásticas com secagem, a menos que certos cuidados sejam tomados durante a cura (SARKER, 2014).

2.9 CIMENTO PORTLAND

A composição do cimento Portland é constituída por silicatos e aluminatos de cálcio, que na presença de água, sofrem uma reação química, formando uma massa gelatinosa (SANTOS, 2012). Esta massa, libera calor na fase de hidratação e transforma-se em um material rígido com elevada resistência mecânica (RICHARDSON, 2016).

A fabricação de cimento Portland é monitorada por uma relação de normas de cimento da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), atualmente são produzidos e encontrados no mercado os tipos I, II, III, IV, e V, que apresentam, respectivamente, as seguintes características: comum, composto, escória de alto forno, pozolânico, e alta resistência mecânica inicial (PORTAL DO CONCRETO, 2016). A caracterização física para o controle dos cimentos Portland é feita através da determinação da resistência à compressão (RICHARDSON, 2016). De acordo com a NBR 7215/96, a resistência dos cimentos brasileiros é definida em função da resistência mínima apresentada através de corpos de prova padronizados após 28 dias de hidratação. São identificadas três classes: Classe 25, classe 32 e

classe 40. Desta forma, um cimento de classe 25 deve apresentar uma resistência à compressão igual ou superior a 25 Mpa.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O estudo para obtenção da argamassa de aluminossilicato e da argamassa de cimento Portland para confecção das placas ocorreu conforme as etapas apresentadas na Figura 3.

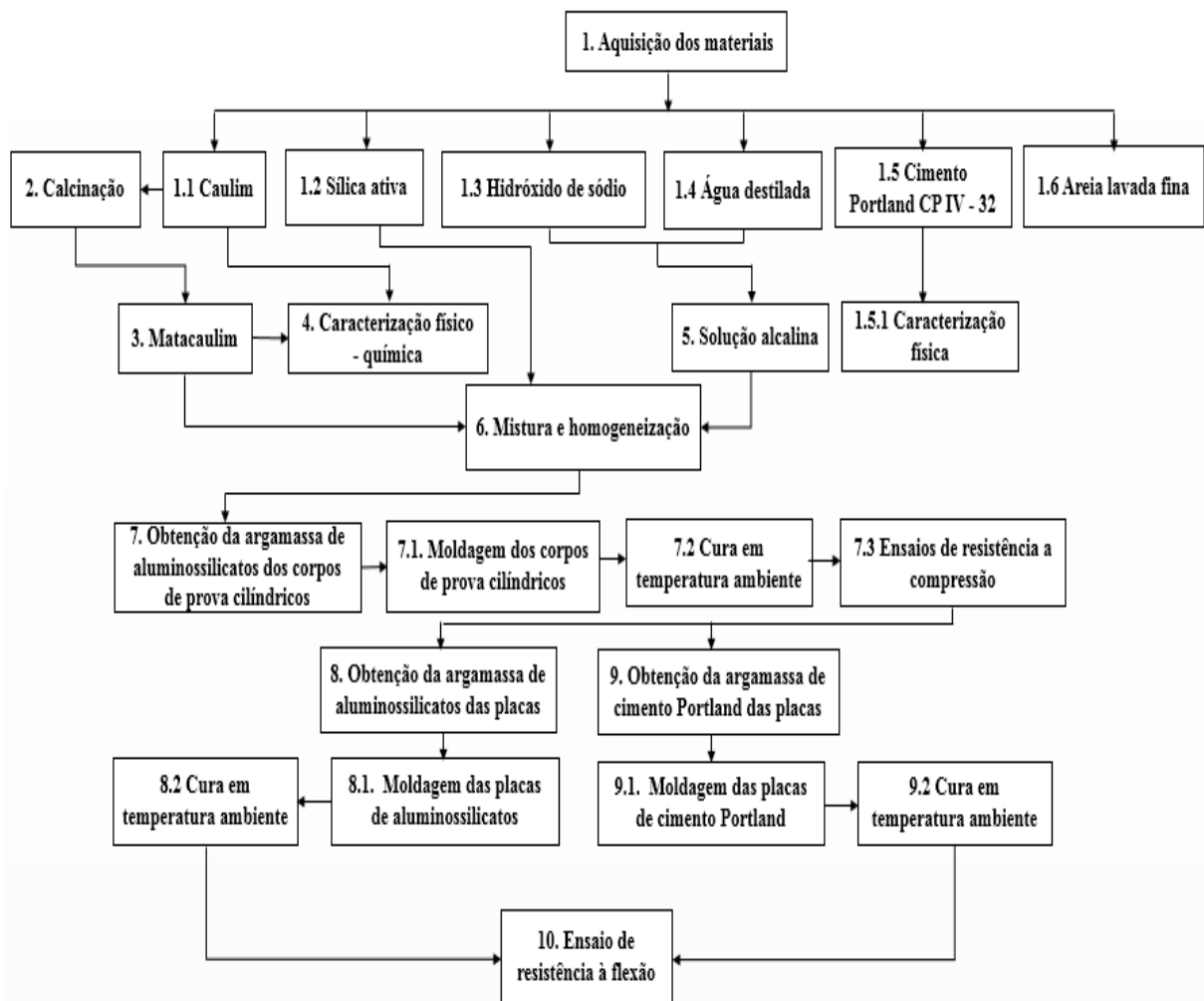


Figura 3 - Fluxograma das etapas desenvolvidas no trabalho experimental

3.1 MATERIAIS

Para obtenção da argamassa de aluminossilicato foi utilizado argila caulinitica de coloração branca, Figura 4A, proveniente do município de Presidente Figueiredo – AM, metacaulim como fonte de alumina e sílica, Figura 4B, sílica ativa, Figura 4C, fornecida pela empresa CONCREPOST de Porto Velho- RO, para garantir o pH na geopolimerização, foi utilizado como ativador alcalino o hidróxido de sódio contendo 96 a 99 % de pureza, Figura 4D, adquirido no comércio local e água destilada.



A



B



C



D

Figura 4 - Materiais utilizados na obtenção da argamassa de aluminossilicato

Fonte: do autor (2016).

A Tabela 3, mostra as propriedades físico-química da sílica ativa fornecida pela empresa Dow Corning Metais do Pará Industria e Comércio Ltda, fabricante da sílica ativa usada neste trabalho.

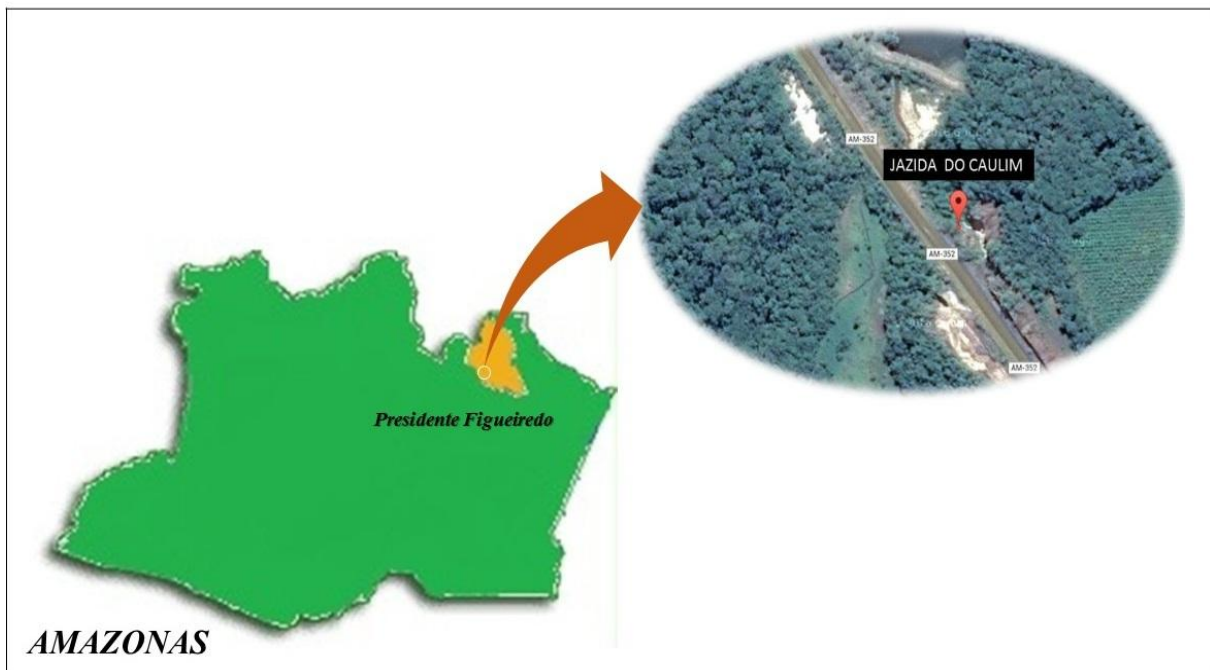
Tabela 3 - Composição físico-química da sílica ativa

Características	Substância	Composição Química (%)
Químicas	Sílica amorfa (SiO ₂)	≥ 85,0
	Sílica cristalina (SiO ₂)	≤ 0,5
	Óxido de sódio (Na ₂ O)	≤ 1,5
	Carbono total (C)	≤ 6,0
	Umidade (H ₂ O)	≤ 3,0
Físicas	Estado físico (CNTP): Sólido	
	Aparência: Pó de dimensões micrométricas	
	Densidade: 150 - 700 kg/m ³	
	Área específica B.E.T.: ≥ 15.000 e ≤ 30.000 m ² /kg	

Fonte: Dow Corning Metais do Pará e Comércio Ltda (2016).

A Figura 5, mostra a localização da jazida de onde foi retirada a argila caulinitica utilizada para obtenção do metacaulim.

Coordenadas: S 03°09'42,2'' W 60°42'28,6''

**Figura 5** – Localização da jazida de argila caulinitica

Fonte: Google Maps (adaptado)

Para obtenção da argamassa de cimento Portland, foi utilizado cimento Portland pozolânico CP IV 32 (Figura 6A), escolhido por ser o mais utilizado na região de Rondônia, como agregado miúdo uma areia natural lavada fina (Figura 6B) e água potável da Companhia de Águas e Esgotos de Rondônia - CAERD/RO.



Figura 6 - Materiais utilizados na obtenção da argamassa de cimento Portland

Fonte: do autor (2016).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Obtenção do metacaulim a partir da calcinação da argila caulinitica

Devido ao fato da argila caulinitica encontrar-se úmida e na forma de torrões, primeiramente procedeu-se a secagem do material em uma estufa elétrica de marca Ethik Technology, modelo 402/D (Figura 7A), à temperatura de 100 °C por 24 horas afim de tirar o excesso de umidade, facilitar o destorroamento e melhorar o processo de calcinação.

Após Secagem a argila foi destorroada manualmente através de um almofariz com pistilo em porcelana com capacidade para 4.170 ml, (Figura 7B), este processo tem como finalidade diminuir a granulometria do material, para Kakali et al. (2001) e Fabbri et al. (2013), a finura do material e as condições de calcinação influi no desenvolvimento das propriedades pozolânicas de argilas calcinadas.

Visando diminuir a granulometria obtida através do processo de destorroamento bem como melhorar a homogeneidade do material, foi feito um peneiramento nas peneiras 300µm

(nº 50), 150 μ m (nº 100), 75 μ m (nº 200) utilizando um agitador de Peneiras Eletromecânico da marca SOLOTEST, (Figura 7C).

Após o peneiramento, utilizou-se cápsulas de porcelana com cerca de 210 gramas do caulim retido na peneira 75 μ m (nº 200), sendo este submetido a calcinação em um forno mufla elétrico microprocessado, marca QUIMIS, modelo Q318M com temperatura máxima de trabalho igual a 1200 °C, (Figura 7D), a 800 °C durante 2 horas, com objetivo de ativar a argila caulinitica, desenvolver atividade pozolânica e obter o metacaulim.

O procedimento foi repetido até que fosse obtido a quantidade necessária para moldar as placas de aluminossilicatos, a escolha da temperatura para calcinação da argila caulinitica baseou-se na literatura existente.



A



B



C



D

Figura 7 - Equipamentos utilizados nas etapas do processo de calcinação do caulim

Fonte: do autor (2016).

3.2.2 Caracterização físico-química da argila caulinitica e da metacaulim

3.2.2.1 Análise química

A análise química dos materiais foi realizada por fluorescência de raios-x para determinar a quantidade de elementos e óxidos presentes nos materiais. Outra técnica utilizada foi difração de raios-X, para determinar o nível de cristalinidade do material. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas. O método utilizado nas análises de fluorescência de raios-x foi o do pó, mediante o emprego de um equipamento marca Epsilon 3-XL, modelo PANalytical. As análises de difração de raios X foram realizados através do método do pó em um equipamento da marca Siemens – modelo D 5000, com velocidade do goniômetro de 1°/min.

3.2.2.2 Análise física

A caracterização física dos materiais foi realizada conforme os métodos descritos a seguir.

Massa específica: Foi determinado utilizando o frasco volumétrico “Le Chatelier, conforme a norma brasileira NBR NM 23, tal equipamento é utilizado para a determinação da massa específica de cimento e outros materiais finos. O ensaio foi realizado no Laboratório de Controle Tecnológico de Solo da Empresa BETONTECH.

Superfície específica: Foi determinada mediante o emprego do permeabilímetro de Blaine, conforme a norma NBR NM 76, que prescreve o método para a determinação da Superfície específica de cimentos e outros materiais em pó. O ensaio foi realizado no Laboratório de Controle Tecnológico de Solo da Empresa BETONTECH.

3.2.3 Preparação das amostras

3.2.3.1 Argamassa de aluminossilicato dos corpos de prova cilíndricos

Para obtenção da argamassa dos corpos de prova, primeiramente foram feitas as soluções alcalinas para ativação do metacaulim, o hidróxido de sódio contendo 96 a 99 % de pureza foi adicionado na água destilada nas proporções mostrado na Tabela 4 e misturado até obter a solubilização, devido ao fato de ocorrer uma reação exotérmica no momento da mistura, as soluções ficaram em repouso até esfriar, a solução apresentou pH igual a 14.

As molaridades das soluções, segundo Feltre (2001), podem ser calculadas através da equação 1.

$$\eta = m/MV \quad \text{Eq. 1}$$

Nesta equação, η é a molaridade da solução, expressa em mol por litro (mol/l), m é a massa do soluto, expressa em grama (g), M é a massa molar do soluto expressa em grama por mol (g/mol), sendo neste caso igual a 40 g/mol, e V é o volume da solução, expressa em litros (l).

Tabela 4 - Composição das soluções alcalinas

Solução	Substância	Quantidade (g)	Molaridade da solução (mol/l)	Água/NaOH
1	Água destilada	86,00	7,85	3,19
	NaOH	27,00		
2	Água destilada	72,00	12,50	2,00
	NaOH	36,00		
3	Água destilada	57,00	19,74	1,27
	NaOH	45,00		
4	Água destilada	72,00	18,75	1,33
	NaOH	54,00		
5	Água destilada	72,00	6,25	4,00
	NaOH	18,00		

Fonte: Dados da pesquisa (2016).

Após este período e separadamente, para preparação das amostras, foi realizada a mistura do metacaulim e da sílica ativa com a solução ativadora e misturadas manualmente utilizando uma espátula de plástico, Figuras 8, até obter uma argamassa com consistência uniforme, de acordo com as proporções mostrado na Tabela 5.



Figura 8 - Amassamento e homogeneização da argamassa

Fonte: do autor (2016).

Tabela 5 - Composição das amostras

Amostras	Substâncias da mistura			
	Metacaulim (g)	Sílica ativa (g)	NaOH (g)	Água (g)
CPAS-1	108,00	45,00	27,00	86,00
CPAS-2	90,00	54,00	36,00	72,00
CPAS-3	72,00	63,00	45,00	57,00
CPAS-4	90,00	36,00	54,00	72,00
CPAS-5	90,00	72,00	18,00	72,00

Fonte: Dados da pesquisa (2016).

Logo após a combinação das misturas, foram moldados para cada molaridade cinco corpos de prova cilíndricos de aluminossilicatos (CPAS) com 50 mm de diâmetro x 100 mm de altura, Figura 9A, com o cuidado de eliminar as bolhas gasosas, Figura 9B, e deixados em repouso por 24 horas, após este período, as amostras foram retiradas dos moldes e curadas à temperatura ambiente por 28 dias, ponto em que elas estavam prontas para o ensaio de resistência à compressão.



Figura 9 - Moldagem dos corpos de prova

Fonte: do autor (2016).

3.2.3.2 Argamassa de aluminossilicato das placas retangulares

Após os ensaios mecânicos dos corpos de prova, foi selecionado como referência o traço da amostra CPAS-5, pois a mesma apresentou maior resistência mecânica a compressão simples. Com este traço foi preparada a argamassa para confecção de três placas cimentícias de aluminossilicatos (PAS). Este procedimento foi realizado de acordo com as quantidades apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição dos materiais referentes as placas

Placas	Substâncias da mistura				Molaridade da solução (mol/l)	pH da solução
	Metacaulim (g)	Sílica ativa (g)	NaOH (g)	Água (g)		
PAS-1 PAS-2 PAS-3	1440,00	1552,00	288,00	1152,00	6,25	14

Fonte: Dados da pesquisa (2016).

Para produção das amostras foi utilizado um batedor de argamassa da marca Cortag acoplado a uma furadeira com regulador de velocidade da marca Skil, Figura 10A, por um período de 13 minutos, até obter uma argamassa homogênea, Figura 10B. Imediatamente após o preparo da argamassa, foram moldadas as placas retangulares com dimensões de 400 mm de comprimento x 100 mm de largura x 15 mm de espessura, Figura 10C, as placas foram deixadas

em repouso por 24 horas, após este período, as amostras foram retiradas dos moldes e curadas à temperatura ambiente, Figura 10D, por 28 dias, ponto em que elas estavam prontas para o teste de sua resistência à flexão em quatro pontos.

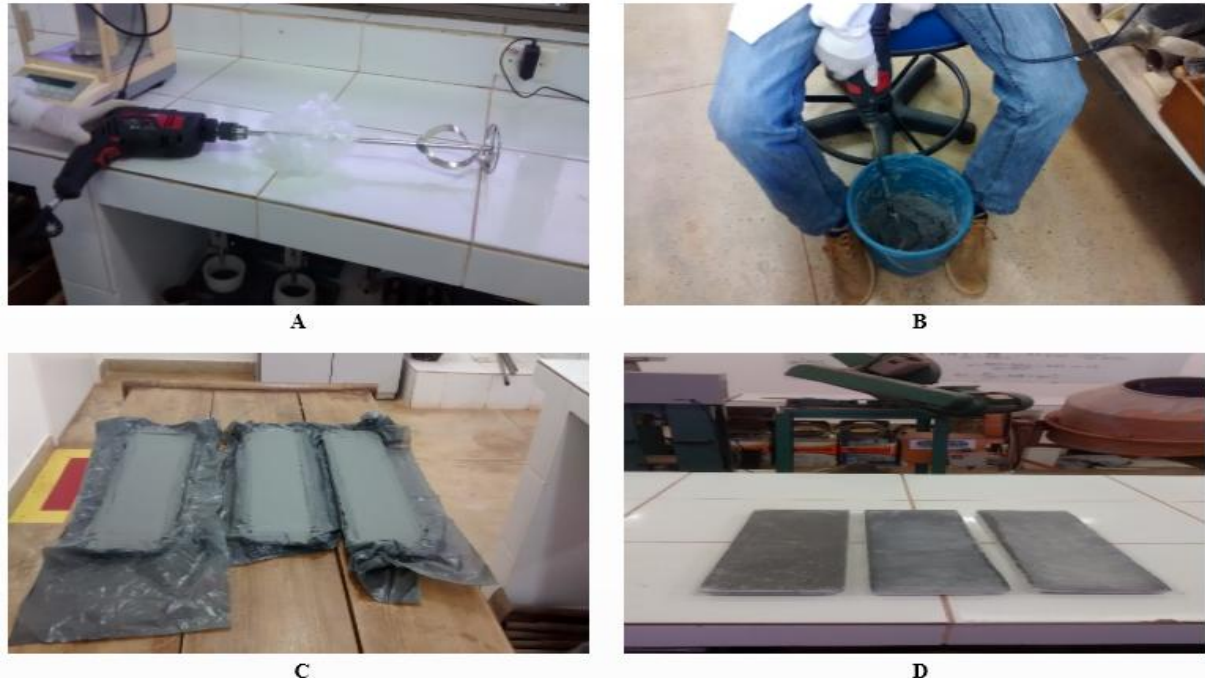


Figura 10 - Equipamentos e obtenção da argamassa e das placas de aluminossilicatos

Fonte: do autor (2016).

3.2.3.3 Argamassa de cimento Portland das placas retangulares

O traço utilizado na preparação da argamassa para confecção das três placas cimentícias de cimento Portland (PCP) está representado na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição dos materiais referentes as placas

Placas	Substâncias da mistura		
	CP IV-32 (g)	Areia lavada fina (g)	Água (g)
PCP-1 PCP-2 PCP-3	1440,00	1152,00	1152,00

Fonte: Dados da pesquisa (2016).

Para produção da argamassa das placas foi utilizado o mesmo equipamento da Figura 10A, por um período de 8 minutos, até obter uma argamassa homogênea, Figura 11A. Imediatamente após o preparo da argamassa, foram moldadas três placas retangulares com 400 mm de comprimento x 100 mm de largura x 15 mm de espessura, Figura 11B. As placas foram deixadas em repouso por 24 horas, após este período, as amostras foram retiradas dos moldes e curadas à temperatura ambiente, figura 11C, por 28 dias, ponto em que elas estavam prontas para o teste de sua resistência à flexão em quatro pontos.

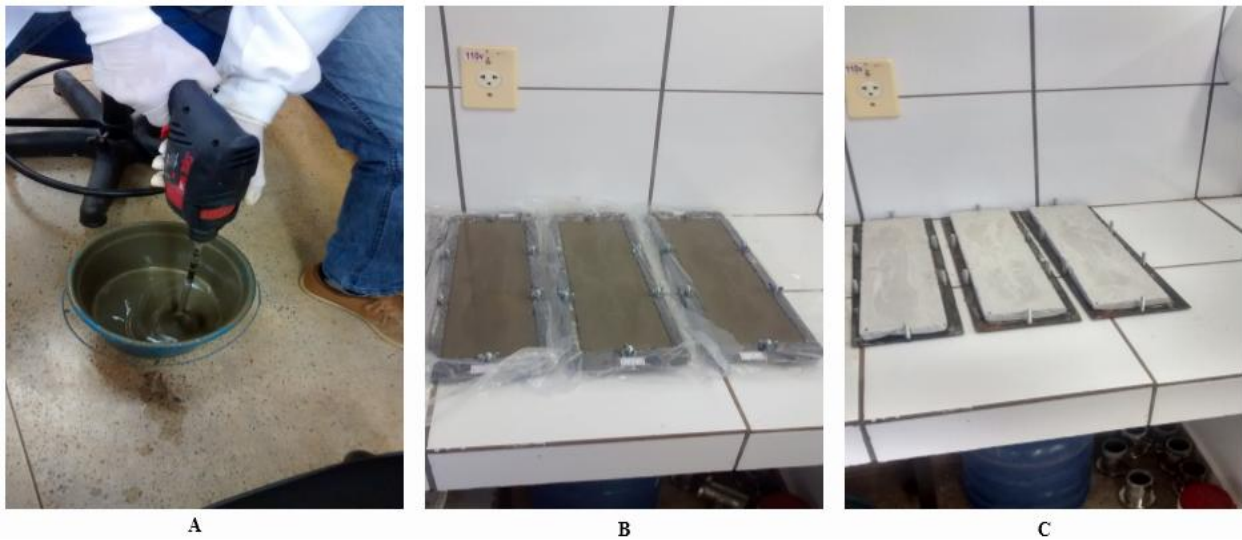


Figura 11 - Obtenção da argamassa e das placas de cimento Portland
Fonte: do autor (2016).

3.2.4 Caracterização dos aluminossilicatos

3.2.4.1 Ensaio mecânico

3.2.4.1.1 Compressão simples - Corpos de prova cilíndricos

Os testes da resistência à compressão dos corpos de prova, figura 12, foram realizados conforme NBR 5739/2007 no laboratório de Controle Tecnológico de Solo da Empresa BETONTECH. O equipamento utilizado foi uma prensa de compressão manual, marca CONTENCO, série 939, com capacidade para 100 tonelada força.



Figura 12 - Rompimento do corpo de prova

Fonte: do autor (2016).

As resistências à compressão em unidades de Megapascal (MPa), foram calculadas pela equação 2.

$$f_c = 4.F/\pi.D^2 \quad \text{Eq. 2}$$

Nesta equação, f_c é a resistência a compressão, em MPa, F é a força máxima alcançada, em Newtons (N), e no denominador, D representa o diâmetro do corpo-de-prova, em milímetros (mm).

3.2.4.1.2 Flexão em quatro pontos - Placas retangulares de aluminossilicatos

Os ensaios de flexão em quatro pontos das placas, Figura 13A e Figura 13B, foram realizados conforme NBR 12142/2010 no laboratório de Controle Tecnológico de Solo da Empresa BETONTECH. O equipamento utilizado foi uma máquina de ensaio de compressão elétrica digital, marca EMIC, série 3044, com capacidade para 100 tonelada força.



Figura 13 - Rompimento das placas de aluminossilicatos

Fonte: do autor (2016).

As resistências à tração na flexão em unidades de Megapascal (MPa), foram calculadas pela equação 3.

$$f_{ct,f} = F \cdot \ell / b \cdot d^2 \quad \text{Eq. 3}$$

Nesta equação, $f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão, expressa em MPa, F é a força máxima alcançada na máquina, expressa em Newtons (N), ℓ é a dimensão do vão entre apoios expressa em milímetros (mm), b é a largura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm), e d é a altura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

3.2.4.1.3 Flexão em quatro pontos - Placas retangulares de cimento Portland

Os ensaios de flexão em quatro pontos das placas de cimento Portland, Figura 14A e Figura 14B, foram realizados conforme NBR 12142/2010 no laboratório de Controle Tecnológico de Solo da Empresa BETONTECH. O equipamento utilizado foi uma máquina de ensaio de compressão elétrica digital, marca EMIC, série 3044, com capacidade para 100 tonelada força.

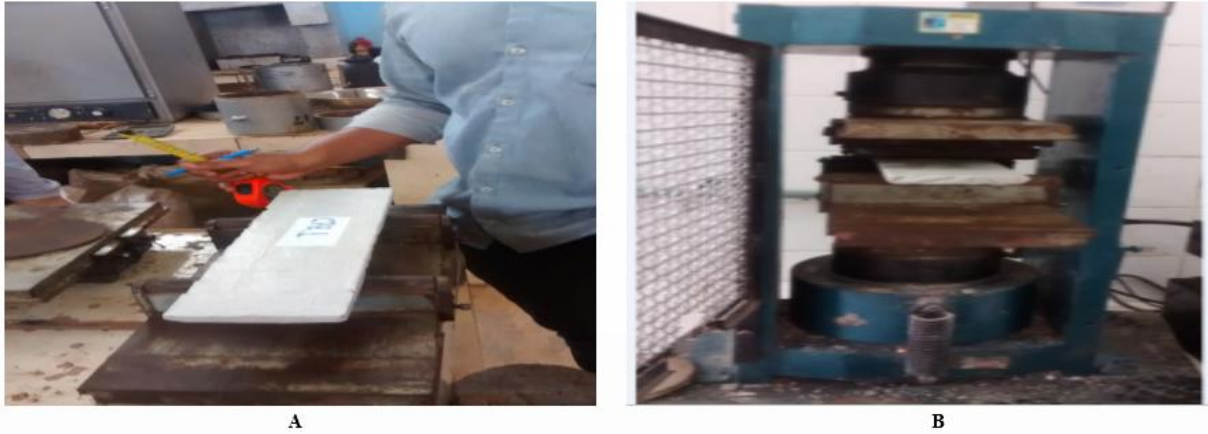


Figura 14 - Rompimento das placas de cimento Portland

Fonte: do autor (2016).

As resistências à tração na flexão em unidades de Megapascal (MPa), foram calculadas pela equação 2.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho, a descrição dos resultados obtidos e suas análises são exibidos de acordo com a sequência dos métodos descritos, sendo: caracterização físico-química da argila caulinitica e do metacaulim, caracterização das placas de aluminossilicatos e caracterização das placas de cimento Portland.

4.1 CARACTERIZAÇÃO POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

As características químicas obtidas por fluorescência de raios-X da argila caulinitica e do metacaulim são exibidas na Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 8 - Composição química da argila caulinitica e do metacaulim

Características	Elementos	Caulim	Metacaulim
Químicas	Si	55,789	55,553
	Al	36,174	37,365
	Ti	2,767	2,585
	Fe	3,311	3,027
	P	0,548	0,479
	Ca	0,474	0,168
	K	0,248	0,228
	Outros	0,689	0,595
	Si/Al	-	1,43

Fonte: Dados da pesquisa (2016).

Conforme se verifica na Tabela 8, a razão Si/Al para o metacaulim é igual a 1,43. Uma das condições para que ocorra a formação de geopolímeros é que a razão Si/Al esteja entre 1 e 3, Figura 1 (DAVIDOVITS, 1994). Segundo Duxson *et al.* (2005) e Rashad, (2013), o ideal é que a razão Si/Al esteja entre 1,2 a 2,5. Baseado nesta análise, o metacaulim pode ser utilizado para a produção das placas de aluminossilicatos.

Tabela 9 - Proporções dos óxidos presentes na argila caulinitica e no metacaulim

Características	Elementos	Caulim	Metacaulim
Químicas	SiO ₂	63,669	62,985
	Al ₂ O ₃	32,904	34,120
	TiO ₂	1,379	1,262
	Fe ₂ O ₃	1,249	1,105
	P ₂ O ₅	0,174	0,110
	CaO	0,246	0,087
	K ₂ O	0,112	0,102
	Outros	0,267	0,229
	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	-	3,13
	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	-	98,210

Fonte: Dados da pesquisa (2016).

A Tabela 9, mostra os resultados das análises químicas dos óxidos presentes no metacaulim, onde se verifica principalmente maior quantidade de sílica e alumina, o que caracteriza o metacaulim como um material que apresenta propriedades reativa e com características pozolânicas. Com os resultados obtidos, também é possível observar que a

somatória dos percentuais dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , é maior que o valor mínimo de 70% estabelecido pela NBR 12653/1992, Tabela 1, classificando desta forma o material como pozolânico.

Quanto a razão molar de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ igual a 3,13 para o material utilizado, conforme estabelecido na Tabela 9, observa-se que o valor obtido está dentro dos limites de razões molares ideais para a produção de geopolímeros que podem variar de 3,0 a 5,5, valores estes descrito por, Davidovits (1982), Duxson *et al.* (2005) e Rashad, (2013), indicando que o metacaulim pode ser utilizado como matéria prima na produção das placas de aluminossilicatos.

4.2 CARACTERIZAÇÃO POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Na figura 15 é apresentada as características mineralógicas da argila caulinitica obtidas no difratograma de raios-x, onde pode ser observado a presença predominante dos argilominerais quartzo e caulinita.

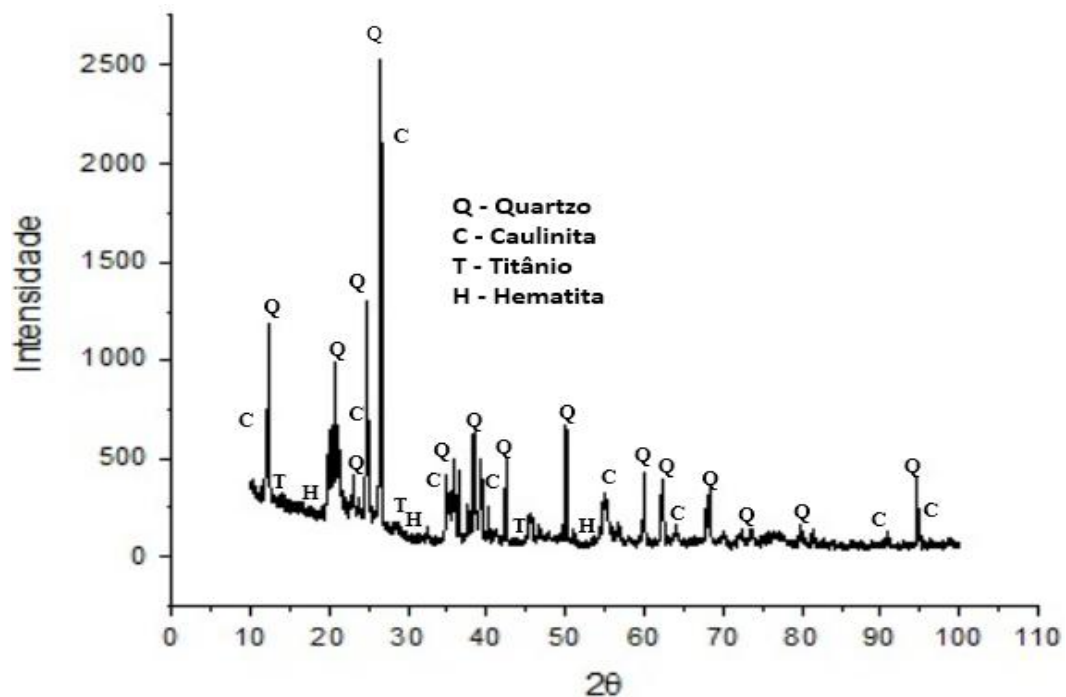


Figura 15 - Difratograma de raios-x da argila caulinitica
Fonte: Dados da pesquisa (2016).

O difratograma de raios-x da Figura 16, mostra as características mineralógicas da metacaulim, onde também pode ser observado a presença predominante dos argilominerais quartzo e caulinita. Pode-se verificar ainda que a intensidade dos picos de cristalinidade diminui, quebrando a estrutura cristalina e consequentemente ocorrendo a formação de amorficidade da amostra.

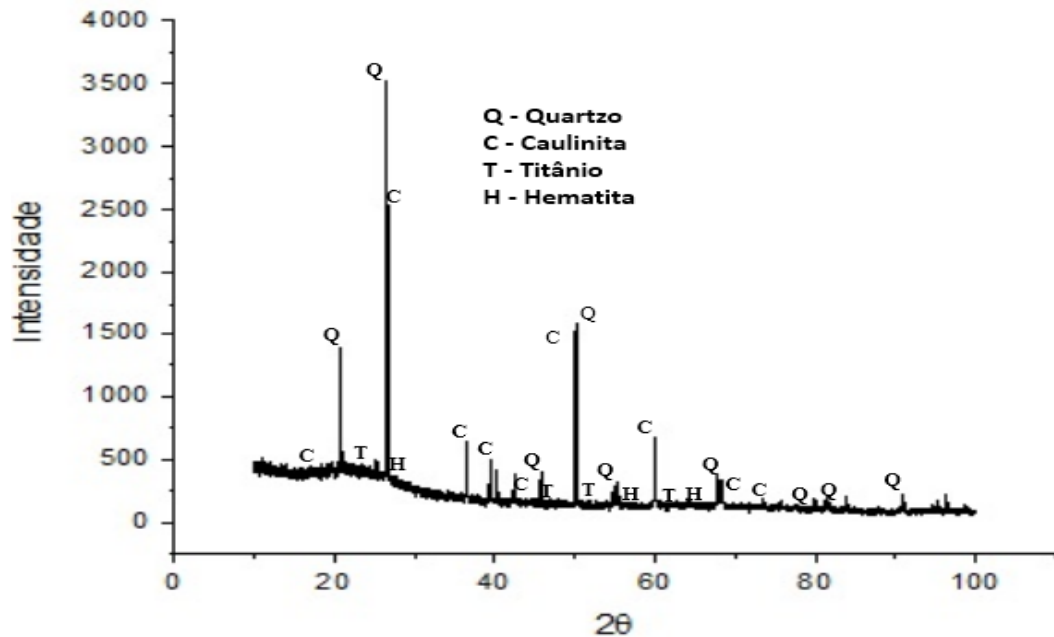


Figura 16 - Difratograma de raios-x da metacaulim

Fonte: Dados da pesquisa (2016).

A presença dos óxidos no metacaulim identificados pela análise química da fluorescência de raios-x, é confirmada através da análise mineralógica de difração de raios-x.

4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ARGILA CAULINITICA E DO METACAUULIM

As características físicas do metacaulim foram obtidas através do frasco volumétrico “Le Chatelier, para determinar a massa específica, e do permeabilímetro de Blaine, para determinar a superfície específica, os resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Massa específica e superfície específica da argila caulinitica, do metacaulim e do cimento Portland

Características	Determinações	Caulim	Metacaulim	Cimento Portland
Físicas	Massa específica	2,590 g/cm ³	2,608 g/cm ³	3,090 g/cm ³
	Superfície específica	7.359 cm ² /g	5.859 cm ² /g	7.664 cm ² /g

Fonte: Dados da pesquisa (2016).

Como se observa, o metacaulim é pouco mais denso que o caulim, significando que apresentam os mesmos minerais. A desigualdade de massa específica entre os dois propõe pouca diferença de composição química. Em função do metacaulim apresentar composição mais fina, conforme os valores obtidos, podemos observar que após a calcinação, o caulim obteve maior superfície específica que o metacaulim.

4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS CORPOS DE PROVA E DAS PLACAS

4.4.1 Caracterização mecânica dos corpos de prova cilíndricos

Os valores de resistência à compressão obtidos para os corpos de prova cilíndricos, curados a temperatura ambiente e rompidos aos 28 dias, são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de resistência a compressão

Corpos de prova cilíndricos de aluminossilicatos		
Amostras	Força máxima (N)	Tensão máxima (MPa)
CPAS 1	11565,95	5,89
CPAS 2	11271,90	5,74
CPAS 3	9997,68	5,09
CPAS 4	10389,75	5,29
CPAS 5	11958,01	6,09

Fonte: Dados da pesquisa (2016).

A resistência à compressão dos corpos de prova em função das molaridades, estão representados na Figura 17.

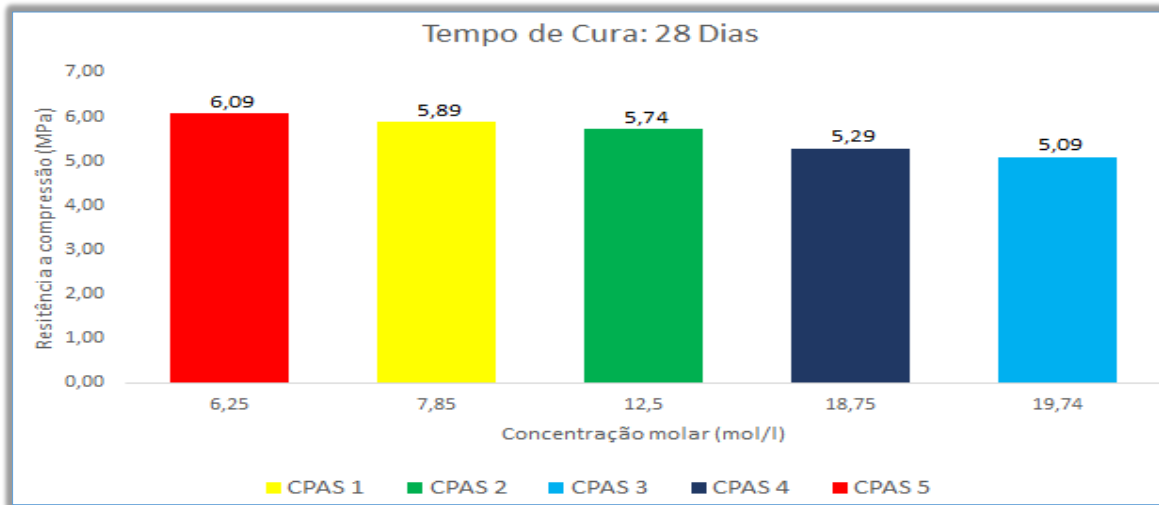


Figura 17 - Gráfico comparativo da resistência a compressão dos corpos de prova curados à temperatura ambiente em função da concentração molar

Fonte: Dados da pesquisa (2016).

Como se verifica na Figura 17, a amostra que apresentou maior resistência mecânica foi aquela com menor concentração molar. Em sua pesquisa, Vassalo (2013), observou a mesma condição, conforme mostra a Figura 18.

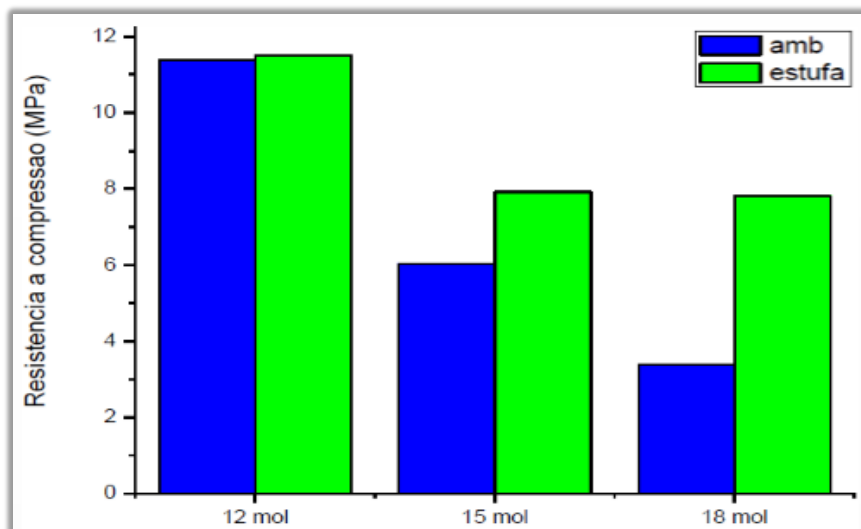


Figura 18 - Gráfico comparativo dos corpos de prova curados à temperatura ambiente e estufa para 28 dias

Fonte: VASSALO (2013)

4.4.2 Caracterização mecânica das placas retangulares

Os valores de resistência à flexão em quatro pontos, obtidos para as placas de aluminossilicatos, Tabela 12, curadas a temperatura ambiente e rompidas aos 28 dias, foi determinado para amostra que apresentou menor concentração molar e maior resistência mecânica a compressão, Figura 17, e comparados com os valores de resistência à flexão em quatro pontos, Tabela 12, obtidos para as placas de cimento Portland.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de resistência a flexão em quatro pontos

Placas de aluminossilicatos			Placas de cimento Portland		
PAS	Força máxima (N)	Tensão máxima (MPa)	PCP	Força máxima (N)	Tensão máxima (MPa)
1	374,42	3,33	1	402,85	3,58
2	390,11	3,47	2	394,03	3,50
3	380,30	3,38	3	409,71	3,64

Fonte: Dados da pesquisa (2016).

A Figura 19, mostra as resistências máximas à flexão para as placas de aluminossilicatos e para as placas de cimento Portland.

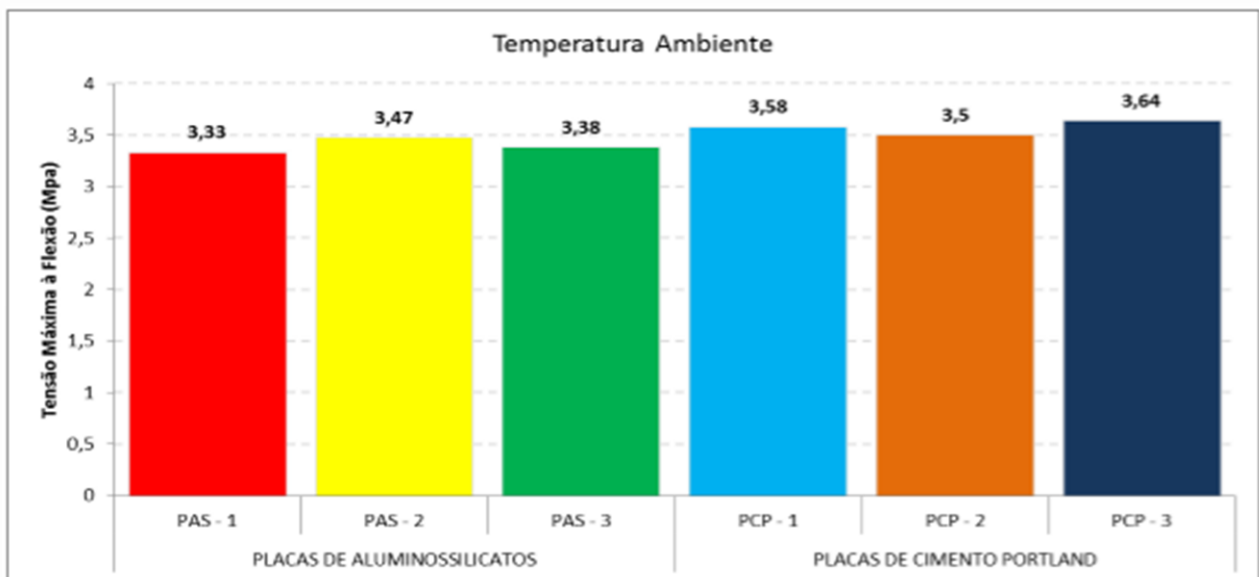


Figura 19 - Gráfico comparativo das tensões máximas das placas de aluminossilicatos e cimento Portland curados aos 28 dias

Fonte: Dados da pesquisa (2016).

Como pode ser observado na Figura 19, as tensões máximas à flexão das placas de cimento Portland (PCP) são ligeiramente maiores que as tensões máximas à flexão das placas de aluminossilicatos (PAS). Comparando a tensão máxima média à flexão para cada classe de placas temos os valores de 3,39 MPa para as PAS e 3,57 MPa para as PCP, correspondendo a 5,3% na diferença das tensões máximas médias.

As menores tensões à flexão das PAS em relação as tensões à flexão das PCP, podem estar relacionadas com diversos fatores, dentre eles aparecem a retração e as microfissuras observadas visualmente nas placas, esse fato ocorre em função da perda de água pelo processo químico de reação exotérmica de cura (LI, 2010).

Verifica-se também, que o cimento Portland por apresenta maior superfície específica que a metacaulim, Tabela 10, caracteriza-se como um material mais fino, resultando em tamanho de poros menores nas PCP em relação as PAS, e conseqüentemente apresenta melhor desempenho mecânico (BAUER, 2011), desta forma, as PAS podem apresentar comportamento de resistência mecânica diferente em relação as PCP.

Os dados utilizados nas composições das amostra foram os mais consistente e confiável para confecção das PAS, os ensaios foram realizados com objetivo de obter uma argamassa para confecção de placas, onde ficou comprovado a capacidade de endurecimento e ganho de resistência em longas idades. Segundo Puertas (2014), a resistência mecânica dos cimentos álcalis-ativados atinge 70 a 80 % de sua resistência final logo nos primeiros dias de idade, havendo pouca diferença após os 28 dias.

5 CONCLUSÕES

A pesquisa possibilitou verificar as características físico-química da argila caulinitica e do metacaulim, bem como a características mecânicas das placas de aluminossilicatos e de cimento Portland obtidas.

Em sua composição química e mineralógica, a argila caulinitica apresentou maior quantidade de sílica e alumina, indicando que o material pode desenvolver atividade pozolânica e ser utilizado como matéria prima para produção do metacaulim.

A argila caulinita após o processo de calcinação manteve sua coloração branca devido a pequena quantidade de hematita presente na sua composição química.

A análise mineralógica de difração de raios-x, confirma a presença dos óxidos no metacaulim identificados pela análise química da fluorescência de raios-x.

A solução alcalina utilizada para ativar o metacaulim produz uma pasta que, quando atinge o estado de endurecimento, apresentam propriedades ligantes. O teor molar da solução alcalina mostrou-se fundamental para a produção das placas de aluminossilicatos.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples mostram que a solução alcalina de 6,25 mol é mais eficiente.

As placas de cimentos Portland por serem constituídas de matérias mais finos, e consequentemente tamanho de poros menores, apresentaram os melhores resultados nos ensaios de resistência à flexão em quatro pontos.

Embora este trabalho tenha sido realizado de maneira explorativa, o mesmo apresentou resultados condizente com a literatura.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Curar as placas de aluminossilicatos em estufa, e avaliar se o produto apresenta maior resistente mecânica à flexão.

Diminuir o tamanho das partículas de metacaulim e avaliar a influência na resistência mecânica à flexão.

Estudar o controle da perda de água e avaliar a influência na retração, com a finalidade de reduzir as fissuras.

Avaliar a influência da porosidade na resistência mecânica das placas de aluminossilicatos.

Analisar a microestrutura das placas de aluminossilicatos através de MEV, e avaliar a influência na resistência mecânica à flexão.

Analisar o Teor de Absorção das placas de aluminossilicatos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). Cimento Portland pozolânico: NBR 5736. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). Materiais pozolânicos: NBR 12653. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996). Determinação da Resistência à compressão: NBR 7215. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998). Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine): NBR NM 76. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica: NBR NM 23. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 5739. Rio de Janeiro

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos: NBR 12142. Rio de Janeiro

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de construção: 2**. Livros Técnicos e Científicos, 2011.

DAVIDOVITS, J., Geopolymers: inorganic polymeric new material ; J. THERM. ANAL., vol.37, p.1633-1656 ,1991.

DAVIDOVITS, J.; Properties of geopolymer cements, Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, p. 131–149, 1994 (a).

DAVIDOVITS, J. “Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology”, Proceedings of the Second International Conference Geopolymère “99”, p. 9-40, Saint-Quentin, France, 1999.

DAVIDOVITS, Joseph (Ed.). **Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions: Proceedings of the World Congress Geopolymer 2005**. Geopolymer Institute, 2005.

DUXSON, Peter et al. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 269, n. 1, p. 47-58, 2005.

DUXSON, P.; MALLICOAT, S.W.; LUKEY, G.C.; KRIVEN, W.M; DEVENTER, J.S.J. VAN. *The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin based geopolymers*, Colloids Surf, p. 8-20, 2007.

FABBRI, B.; GUALTIERI, S.; LEONARDI, C. Modifications induced by the thermal treatment of kaolin and determination of reactivity of metakaolin. **Applied Clay Science**, v. 73, p. 2-10, 2013.

FELTRE, Ricardo. **Fundamentos da química: 3**. Moderna, 2001.

FERNANDEZ, Rodrigo; MARTIRENA, Fernando; SCRIVENER, Karen L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: a comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 1, p. 113-122, 2012.

FITOS, Michalis et al. Pozzolanic activity of thermally and mechanically treated kaolins of hydrothermal origin. **Applied Clay Science**, v. 116, p. 182-192, 2015.

GOÑI, S. et al. Sodium sulphate effect on the mineralogy of ternary blended cements elaborated with activated paper sludge and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 313-319, 2014.

GÖRHAN, Gökhan; KÜRKLÜ, Gökhan. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. **Composites part b: engineering**, v. 58, p. 371-377, 2014.

HAHA, M. Ben et al. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag—Part II: Effect of Al₂O₃. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 1, p. 74-83, 2012.

LI, Chao; SUN, Henghu; LI, Longtu. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+ Ca) and metakaolin (Si+ Al) cements. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 9, p. 1341-1349, 2010.

KAKALI, G. et al. Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity. **Applied clay science**, v. 20, n. 1, p. 73-80, 2001.

KOMNITSAS, Kostas et al. Removal of heavy metals from leachates using organic/inorganic permeable reactive barriers. **Desalination and Water Treatment**, v. 51, n. 13-15, p. 3052-3059, 2013.

LOWRY, Daniel R.; KRIVEN, Waltraud M. Effect of high tensile strength polypropylene chopped fiber reinforcements on the mechanical properties of sodium based geopolymer composites. In: **Ceramic Engineering and Science Proceedings**. 2010. p. 47.

MAURY, Maria Beatriz; BLUMENSCHHEIN, Raquel Naves. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, v. 3, n. 1, p. 75-95, 2012.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo Jose Melaragno. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Ibracon, 2008.

MELO, L. G. A. Síntese e Caracterização de Geopolímero Contendo Filitos. Dissertação de Mestrado do Instituto Militar de Engenharia - IME, 2011.

MURTA, F. L. Produção de argamassa a partir da ativação alcalina de metacaulim e de resíduo de tijolo moído por cales Virgem hidratada. Dissertação de Mestrado da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 2008.

OLIVEIRA, MP de; BARBOSA, Normando P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 490-496, 2006.

PACHECO-TORGAL, F. et al. An overview on the potential of geopolymers for concrete infrastructure rehabilitation. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 1053-1058, 2012.

PALOMO, A.; RUIZ-SANTAQUITERIA, C.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; **Cementos de bajo impacto ambiental: activación alcalina de aluminosilicatos**. X Congreso Latino Americano de Patología y XII Congreso de Calidad en la Construcción.CONPAT 2009. Valparaíso-Chile,2009.

PANGDAENG, Saengsuree et al. Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. **Materials & Design**, v. 53, p. 269-274, 2014.

PERNÁ, Ivana; HANZLÍČEK, Tomáš; ŠUPOVÁ, Monika. The identification of geopolymer affinity in specific cases of clay materials. **Applied Clay Science**, v. 102, p. 213-219, 2014.

PHAIR, J. W.; VAN DEVENTER, J. S. J. Characterization of fly-ash-based geopolymeric binders activated with sodium aluminate. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 41, n. 17, p. 4242-4251, 2002.

PINTO, Amândio Teixeira. **SISTEMAS LIGANTES OBTIDOS POR ATIVAÇÃO ALCALINA DO METACAULINOO**. 2004. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DO MINHO.

PORTAL DO CONCRETO. Cimento. 2016. Disponível em:<<http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/cimento.html/>>. Acesso em: 02 de junho de 2016.

PROVIS, John L., and Susan A. Bernal. "Geopolymers and related alkali-activated materials." *Annual Review of Materials Research* 44 (2014): 299-327.

PUERTAS, F., and M. Torres-Carrasco. "Use of glass waste as an activator in the preparation of alkali-activated slag. Mechanical strength and paste characterisation." *Cement and Concrete Research* 57 (2014): 95-104.

RASHAD, Alaa M. "Properties of alkali-activated fly ash concrete blended with slag." *Iran J Mater Sci Eng* 10.1 (2013): 57-64.

RICHARDSON, I. G. et al. Hydration of water-and alkali-activated white Portland cement pastes and blends with low-calcium pulverized fuel ash.**Cement and Concrete Research**, v. 83, p. 1-18, 2016.

ROMAGNOLI, Marcello et al. Rheology of geopolymer by DOE approach.**Construction and Building Materials**, v. 36, p. 251-258, 2012.

RYU, Gum Sung et al. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 409-418, 2013.

SANTA, RA ANTUNES BOCA, et al. "DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS A PARTIR DE CINZAS PESADAS POR ATIVAÇÃO ALCALINA." *Blucher Chemical Engineering Proceedings* 1.2 (2015): 9290-9296.

SANTA, Rozineide A. Antunes Boca et al. Geopolymer synthesized from bottom coal ash and calcined paper sludge. **Journal of Cleaner Production**, v. 57, p. 302-307, 2013.

SANTOS, P. Souza. Ciência e Tecnologia de Argilas, Vol. 1, Edgard Blücher, S. Paulo, SP (1989) 194. **Rec. 28/10/2011, Ac. 30/03**, 2012.

SANTOS, E. A. et al. Influence of diatomite addition in the properties of geopolymeric pastes: fluid loss control volume, thickening time and compressive strength. **Cerâmica**, v. 61, n. 359, p. 309-316, 2015.

SARKER, Prabir Kumar; KELLY, Sean; YAO, Zhitong. Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete. **Materials & Design**, v. 63, p. 584-592, 2014.

SHI, Caijun et al. The hydration and microstructure of ultra high-strength concrete with cement–silica fume–slag binder. **Cement and Concrete Composites**, v. 61, p. 44-52, 2015.

SILVA, A. M. et al. INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO NA SÍNTESE DE GEOPOLÍMERO USANDO A ESCÓRIA COMO PRECURSOR. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 13352-13359, 2015.

SOURI, Alireza et al. An investigation on pozzolanic activity of Iranian kaolins obtained by thermal treatment. **Applied Clay Science**, v. 103, p. 34-39, 2015.

STEVENSON, Christopher M.; GURNICK, Mary. Structural collapse in kaolinite, montmorillonite and illite clay and its role in the ceramic rehydroxylation dating of low-fired earthenware. **Journal of Archaeological Science**, v. 69, p. 54-63, 2016.

TECNOSIL. Sílica Ativa. 2016. Disponível em: <<http://www.tecnosilbr.com.br/produtos-aditivos-saco-soluvel-concreto/>>. Acesso em: 23 de maio de 2016.

TIRONI, Alejandra et al. Kaolinitic calcined clays–Portland cement system: Hydration and properties. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 215-221, 2014.

TORGAL, Fernando Pacheco; JALALI, Said. Cimento Portland normal versus ligantes geopoliméricos: Durabilidade e desempenho ambiental. 2010.

VALENCIA, Nancy Montes. Cementos Alcalinos: Materiales de Construcción Ecológicos. **Revista CINTEX**, v. 19, 2014.

VAN JAARSVELD, J. G. S. et al. The stabilisation of mine tailings by reactive geopolymerisation. **Publications of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy**, v. 5, n. 2000, p. 363-371, 2000.

VASSALOS, E.A.S. Obtenção de Geopolímero a partir de Metaculim Ativado. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Minas Gerais – MG, 2013.

VINSON, Jack R.; SIERAKOWSKI, Robert L. **The behavior of structures composed of composite materials**. Springer Science & Business Media, 2012.

WALLAH, S.E.; RANGAN, B.V. Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Long-term properties. Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia, p. 107, 2006.

WARNER, Skyler J. The role of alumina in the mitigation of alkali-silica reaction. 2012.