

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**AVALIAÇÃO DOS AGREGADOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL
EM MATRIZ GEOPOLIMÉRICA VISANDO APLICAÇÃO
EM PISOS INTERTRAVADOS**

Leonardo Suave

São Carlos-SP
2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**AVALIAÇÃO DOS AGREGADOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL
EM MATRIZ GEOPOLIMÉRICA VISANDO APLICAÇÃO EM PISOS
INTERTRAVADOS**

Leonardo Suave

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais como requisito
parcial à obtenção do título de MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Prof. Dr. Márcio Raymundo Morelli

Agência Financiadora: CAPES – Processo:88887.601932/2021-00

São Carlos-SP
2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus por proporcionar forças nas horas mais difíceis e aos meus familiares e companheira pelo apoio e carinho durante a trajetória.

VITAE DO CANDIDATO

Bacharel em Engenharia Civil pela
Universidade de Franca – UNIFRAN, Franca/SP (2018).



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Leonardo Suave, realizada em 14/04/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Márcio Raymundo Morelli (UFSCar)

Profa. Dra. Ana Paula da Luz (UFSCar)

Prof. Dr. Diego Fernandes Neris (UFPR)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e avós, Clovis, Lucia, Luzia e Pedro pelo amor e incentivo em sempre continuar estudando.

A minha companheira Tassiane pelo apoio durante essa trajetória.

Ao meu orientador Márcio Raymundo Morelli pelo carinho, aprendizado e empenho ao meu trabalho.

Ao meu professor de graduação Glauco pelo estímulo a carreira acadêmica.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo concedida, Processo: 88887.601932/2021-00.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

A produção do cimento Portland (CP) é vista como agravante ao meio ambiente, assim cientistas e engenheiros buscam alternativas para substituir este tipo de ligante. Geopolímeros apresentam potencial de substituição do CP, pois visa redução da emissão de CO₂ e contribui com elevada resistência à compressão. Portanto, este trabalho teve como objetivo o preparo de concretos a partir de ligante geopolimérico obtido com metacaulim comercial e hidróxido de sódio (concentração de 12 mols) e pH acima de 12, respeitando razão Si/Al igual a 2, a qual é apropriada para aplicação em pavimentos intertravados. Outro ponto de interesse foi a avaliação de agregado graúdo proveniente de resíduos da construção civil (RCC), especialmente os provenientes de cerâmicas vermelhas em comparação ao agregado graúdo convencional (brita). Aplicação de resíduos de construção civil em geopolímeros são escassos na literatura, sendo necessário a análise comparativa com concreto de CP. A metodologia consistiu no preparo dos concretos sob mesmas condições, ou seja, cura a temperatura ambiente e conformação por peças dormidas. Inicialmente as características analisadas determinantes para aplicação foram a resistência à compressão e absorção de água, ambas aos 28 dias de cura. Os resultados mostraram que apenas a composição de CP com brita atendeu as especificações para aplicação de pavimentos intertravados (39MPa), e que as matrizes geopoliméricas são fortemente dependentes do grau de cristalinidade do precursor e adequação do ativador, fatores que só foram confirmados por novas composições com metacaulim de diferentes cristalinidades e diferente ativador de mesmo pH (compostos pela mistura de silicato e hidróxido de sódio)- Concluiu-se que a caracterização prévia da matéria-prima precursora é importante, sobretudo quanto a sua composição química e cristalinidade. Para o desenvolvimento de concretos geopoliméricos destinado a pavimentos intertravados o metacaulim produzido e/ou comercial empregado na matriz foram exclusivamente contribuintes para baixa resistência à compressão obtida.

Palavras-chave: Intertravados; Resíduos; Geopolímeros; Metacaulim

ABSTRACT

**EVALUATION OF CONSTRUCTION WASTE AGGREGATES IN A
GEOPOLYMERIC MATRIX AIMING FOR APPLICATION IN INTERLOCKED
FLOORS**

The production of Portland cement (PC) is seen as aggravating the environment, so scientists and engineers look for alternatives to replace this type of binder. Geopolymers have the potential to replace CP, as it aims to reduce CO₂ emissions and contributes to high compressive strength. Therefore, this work aimed to prepare concrete from geopolymeric binder obtained with commercial metakaolin and sodium hydroxide (concentration of 12 mol) and pH above 12, respecting the Si/Al ratio equal to 2, which is appropriate for application in interlocking floors. Another point of interest was the evaluation of coarse aggregate from civil construction waste (RCC), especially those from red ceramics compared to conventional coarse aggregate (gravel). Application of civil construction waste in geopolymers is scarce in the literature, requiring a comparative analysis with CP concrete. The methodology consisted of preparing the concrete under the same conditions, that is, curing at room temperature and forming by sleeping pieces. Initially, the determinant characteristics analyzed for application were the compressive strength and water absorption, both at 28 days of curing. The results showed that only the composition of CP with crushed stone met the specifications for the application of interlocking pavements (39MPa), and that the geopolymer matrices are strongly dependent on the degree of crystallinity of the precursor and suitability of the activator, factors that were only confirmed by new compositions. with metakaolin of different Christianity and different activator of the same pH (composed of a mixture of silicate and sodium hydroxide). It was concluded that the previous characterization of the precursor raw material is important, especially regarding its chemical composition and crystallinity. For the development of geopolymer concrete for interlocking pavements, the produced and/or commercial metakaolin used in the matrix were exclusively contributors to the low compressive strength obtained.

Keywords: Interlocked; waste; geopolymers; metakaolin

ÍNDICE DE ASSUNTOS

	Pág.
FOLHA DE APROVAÇÃO.....	i
AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vii
SUMÁRIO.....	ix
ÍNDICE DE TABELAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo Geral.....	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	5
3.1 Pavimento intertravado	5
3.1.1 Características dos pavimentos intertravados de peças de concreto pré-fabricados	7
3.1.2 Formato e dimensões das peças de concreto para pavimentação...	8
3.1.3 Processo de fabricação das peças de concreto para pavimentação	9
3.2 Cimento Portland.....	10
3.3 Agregados para concreto.....	13
3.3.1 Tipos de agregados.....	13
3.3.2 Agregados reciclados de resíduos da construção civil.....	14
3.4 Geopolímeros.....	16
3.4.1 História dos Geopolímeros.....	17
3.4.2 Processo de síntese de geopolímeros.....	18
3.4.3 Precursores geopoliméricos.....	21
3.4.3.1 Metacaulim	22
3.4.4 Soluções ativadoras.....	24
3.4.5 Razão Molar SiO ₂ /Al ₂ O ₃	26
3.4.6 Mercado para geopolímeros.....	27

4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.1 Procedimento Experimental.....	35
4.2 Materiais.....	37
4.2.1 Adequação dos componentes para concretos geopoliméricos.....	38
4.2.1.1 Metacaulim.....	38
4.2.1.2 Agregado.....	39
4.3 Dosagem do concreto.....	42
4.3.1 Preparação do concreto de cimento Portland com agregado convencional e agregado RCC.....	43
4.3.1.1 Conformação e cura dos corpos de prova.....	45
4.3.2 Síntese do geopolímero.....	47
4.3.2.1 Solução ativadora alcalina.....	47
4.3.2.2 Preparo do ligante geopolimérico.....	48
4.3.2.3 Produção do concreto geopolimérico a partir do agregado convencional e do RCC.....	49
4.3.2.4 Conformação e cura dos corpos de prova.....	50
4.4 Caracterização dos corpos de prova.....	51
4.5 Envelhecimento Acelerado.....	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
5.1 Análise química do Metacaulim comercial.....	55
5.2 Agregados.....	56
5.2.1 Granulometria do agregado miúdo.....	56
5.2.2 Granulometria do agregado graúdo.....	57
5.2.3 Absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente dos agregados graúdos.....	61
5.3 Caracterização dos corpos de prova de concreto de cimento Portland e concreto com ligante geopolimérico.....	62
5.3.1 Absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente.....	62
5.3.2 Resistência à compressão.....	63
5.3.3 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio.....	66
5.3.4 Caracterização microestrutural.....	67

5.4 Envelhecimento Acelerado dos corpos de prova das composições selecionadas.....	74
5.4.1 Absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente....	75
5.4.2 Resistência à compressão.....	75
5.4.3 Caracterização microestrutural.....	77
5.5 Análise do desempenho do metacaulim comercial utilizado.....	79
5.5.1 Difração de raios X do metacaulim comercial.....	79
5.6 Desempenho de diferentes metacaulins como precursor geopolimérico.....	81
5.6.1 Caracterização dos novos precursores geopoliméricos.....	81
5.6.1.1 Tratamento térmico.....	81
5.6.1.2 Difração de raios X dos diferentes precursores.....	83
5.6.2 Conformação de corpos de prova.....	85
5.6.3 Caracterizações dos corpos de prova.....	86
5.6.3.1 Absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente...	87
5.6.3.2 Resistência à compressão.....	88
5.6.3.3 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio.....	90
5.6.3.4 Caracterização microestrutural.....	91
6 CONCLUSÃO.....	95
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	97
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 4.1 – Especificações do hidróxido de sódio	37
Tabela 4.2 – Fator de correção.....	52
Tabela 5.1 – Composição química do metacaulim comercial.....	55
Tabela 5.2 – Quantidade de areia passante em cada malha a partir de 750g de material.....	56
Tabela 5.3 – Quantidade de brita passante em cada malha a partir de 1,5kg de material.....	58
Tabela 5.4 - Quantidade de RCC passante em cada malha a partir de 1 kg de material.....	59
Tabela 5.5 – Resultados da absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente dos agregados graúdos.....	61
Tabela 5.6 – Caracterização da absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente dos corpos de prova de concreto de cimento Portland e concreto de ligante geopolimérico.....	62
Tabela 5.7 – Análise química elementar por espectroscopia de raios X (EDS) do ponto 1 demarcado na Figura 5.11B.....	70
Tabela 5.8 - Análise química elementar por espectroscopia de raios X (EDS) do ponto P demarcado na Figura 5.14B.....	73
Tabela 5.9 - Caracterização da absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente dos corpos de prova de concreto de cimento Portland antes e após ensaio de envelhecimento acelerado.....	75
Tabela 5.10 – Composição química elementar do caulim calcinado obtida por fluorescência de raios X.....	83
Tabela 5.11 – Caracterização da absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente dos corpos de prova geopoliméricos.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3.1 – Pavimento intertravado de peças de concreto pré-fabricadas	5
Figura 3.2 - Peças de concreto pré-fabricadas do tipo I	8
Figura 3.3 - Peças de concreto pré-fabricadas do tipo II	8
Figura 3.4 - Peças de concreto pré-fabricadas do tipo III	9
Figura 3.5 - Peças de concreto pré-fabricadas do tipo IV	9
Figura 3.6 – Esquematização do processo de fabricação do cimento Portland	11
Figura 3.7 – Aluminatos e silicatos hidratados no cimento Portland: a) etringita C_6ASH_32 ; b) hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$	12
Figura 3.8 – Estrutura dos polissialatos	19
Figura 3.9 – Processos da geopolimerização	20
Figura 3.10 – Aplicações dos geopolímeros a partir da razão molar	27
Figura 3.11 – Consumo de energia na produção do concreto Portland ...	29
Figura 3.12 – Consumo de energia na produção do concreto geopolimérico	29
Figura 3.13 - Comparativo entre algumas propriedades do cimento geopolimérico e cimento Portland	31
Figura 3.14 – Aeroporto de Brisbane West Wellcamp (Australia) construído com concreto geopolimérico	32
Figura 4.1 – Fluxograma representativo das principais etapas do plano experimental	36
Figura 4.2 – Resíduo de construção civil proveniente de cerâmica vermelha	39
Figura 4.3 – Britador de mandíbula	40
Figura 4.4 – Conjunto de peneiras metálicas e agitador mecânico	41
Figura 4.5 – Mistura do concreto de referência: (a) misturador planetário; (b) concreto de cimento Portland e brita	43
Figura 4.6 – Concreto de cimento Portland e RCC: (a) RCC seco; (b) RCC úmido	45

Figura 4.7 – Mesa vibratória	46
Figura 4.8 – Corpos de prova moldados: (a) Cimento Portland e brita 0; (b) Cimento Portland e RCC seco; (c) Cimento Portland e RCC úmido.	46
Figura 4.9 – Preparo da solução ativadora de NaOH: (a) NaOH em escamas; (b) Mistura do NaOH em água; (c) Solução ativadora de NaOH pronta no balão volumétrico com concentração de 12 mols/l	47
Figura 4.10 – Ligante geopolimérico	49
Figura 4.11 – Mistura do concreto geopolimérico	50
Figura 4.12 – Corpos de prova de concreto geopoliméricos: (a) geopolímero e brita 0; (b) geopolímero e RCC	51
Figura 4.13 – Porosímetro de Mercúrio	53
Figura 4.14 – Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado durante as análises microestruturais	53
Figura 4.15 – Procedimento para o ensaio de envelhecimento acelerado: (a) imersão em água; (b) secagem em estufa	54
Figura 5.1 – Distribuição granulométrica da areia média	57
Figura 5.2 – Areia média	57
Figura 5.3 – Distribuição granulométrica da brita	58
Figura 5.4 – Agregado graúdo convencional	59
Figura 5.5 – Distribuição granulométrica do resíduo de construção civil...	60
Figura 5.6 – Agregado graúdo proveniente do RCC	60
Figura 5.7 – Resistência à compressão axial dos corpos de provas das composições de concretos de cimento Portland e de ligante geopolimérico com diferentes agregados, brita e RCC	64
Figura 5.8 – Distribuição dos tamanhos dos poros obtidos por porosimetria de Hg para os corpos de prova de concreto de cimento Portland e de ligante geopolimérico com diferentes agregados, brita e RCC	66
Figura 5.9 – Micrografias obtidas por Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura do corpo de prova de concreto de cimento Portland com brita (CPB)	68

Figura 5.10 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura interface do corpo de prova de cimento Portland com agregado RCC úmido (CPRU)	69
Figura 5.11 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura do corpo de prova de ligante geopolimérico com brita (CGB)	70
Figura 5.12 – Análise química elementar por EDS no ponto 1 demarcado na Figura 5.11B	71
Figura 5.13 – Imagem do fenômeno de exsudação do sódio na superfície do corpo de prova de ligante geopolimérica com brita (CGB) com ativador NaOH	72
Figura 5.14 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura do corpo de prova de concreto de ligante geopolimérico com agregado RCC (CGR)	73
Figura 5.15 - Análise química elementar por EDS no ponto P demarcado na Figura 5.14B	73
Figura 5.16 – Imagens dos corpos de prova das composições selecionadas após ensaio de envelhecimento acelerado: (a) CPB; (b) CPRU e (c) CPR	74
Figura 5.17 – Resistência à compressão dos corpos de prova de concreto de cimento Portland com diferentes agregados, brita (CPB), RCC (CPR) e RCC úmido (CPRU) após o ensaio de envelhecimento acelerado	76
Figura 5.18 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura do corpo de prova de cimento Portland com agregado brita (CPB) após ensaio de envelhecimento acelerado	77
Figura 5.19 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura do corpo de prova de cimento Portland com agregado RCC úmido (CPRU) após ensaio de envelhecimento acelerado	78

Figura 5.20 – Difractometria do metacaulim comercial	80
Figura 5.21 – Forno elétrico tipo mufla utilizado para a calcinação do caulim e do metacaulim comercial para obtenção de precursores geopoliméricos	82
Figura 5.22 – Imagens das amostras de metacaulins antes e após tratamento térmico em 750°C durante 3 horas	82
Figura 5.23 – Difractograma do metacaulim comercial calcinado a 750°C durante 3 horas	84
Figura 5.24 – Difractograma do caulim calcinado a 750°C durante 3 horas	85
Figura 5.25 – Corpos de prova moldados com ligante geopolimérico com diferentes precursores: (a) metacaulim comercial; (b) metacaulim comercial calcinado; (c) caulim calcinado	86
Figura 5.26 – Resistência à compressão axial dos corpos de prova geopoliméricos	89
Figura 5.27 - Distribuição do tamanho dos poros obtidos por porosimetria de Hg para os corpos de geopolímeros	90
Figura 5.28 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura do corpo de prova de ligante geopolimérico a partir de caulim calcinado e solução ativadora de hidróxido de sódio e silicato de sódio (GCCHS).....	92
Figura 5.29 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura do corpo de prova de ligante geopolimérico a partir de caulim calcinado e solução ativadora de hidróxido de sódio e silicato de sódio (GCCHS): A) elétrons secundários e B) elétrons retroespalhados.....	92

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

CP	Cimento Portland
CO ₂	Dióxido de Carbono
Si	Silício
Al	Alumínio
RCC	Resíduo de Construção Civil
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ARI	Alta Resistência Inicial
RS	Resistência a Sulfatos
CPB	Cimento Portland Branco
C ₃ S	Silicato Tricálcico
C ₂ S	Silicato Dicálcico
C ₃ A	Aluminato Tricálcico
C ₄ AF	Ferro Aluminato Tetracálcico
C ₆ ASH ₃₂	Etringita
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
NaOH	Hidróxido de Sódio
Na ₂ CO ₃	Barrilha
CaCO ₃	Calcita
K	Potássio
Na	Sódio
Ca	Cálcio
Li	Lítio
SiO ₄	Silicato
AlO ₄	Aluminato
SiO ₂	Sílica
Al ₂ O ₃	Alumina
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro
TiO ₂	Dióxido de Titânio

CaO	Óxido de Cálcio
MgO	Óxido de Magnésio
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
KOH	Hidróxido de Potássio
MPa	Mega Pascal
FRX	Fluorescência de Raios-X
LCE	Laboratório de Caracterização Estrutural
AA	Absorção de Água
PA	Porosidade Aparente
DA	Densidade Aparente
Hg	Mercúrio
CPB	Concreto de cimento Portland com Brita
CPR	Concreto de cimento Portland com Resíduo
CPRU	Concreto de cimento Portland com Resíduo Umedecido
CGB	Concreto Geopolimérico com Brita
CGR	Concreto Geopolimérico com Resíduo
AG	Agregado
M	Metacaulim
EDS	Espectroscopia de Raios-X
F	Fraturas
P	Poros
ED	Etringita Degradada
E	Etringita
DRX	Difratometria de Raios-X
GM	Geopolímero de Metacaulim Comercial
GMC	Geopolímero de Metacaulim Comercial Calcinado
GCC	Geopolímero de Caulim Calcinado
GCCHS	Geopolímero de Caulim Calcinado com Hidróxido de sódio

e Silicato de sódio

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil demonstra um constante crescimento ao longo dos últimos anos, demandando cada vez mais edificações, principalmente em países em desenvolvimento, onde a necessidade é maior. Diante disso, o consumo de concreto se destaca, sendo este o principal material utilizado nas construções e reformas, e também o segundo material mais consumido no mundo, ficando atrás apenas da água.

Convencionalmente o concreto utilizado nas obras é preparado a base de cimento Portland, ligante produzido por meio do clínquer (cimento base) e outras adições, como gesso, calcário, escoria de alto forno (proveniente da produção do ferro gusa) ou pozolana (material que contém elevado teor de sílica reativa). O clínquer é formado pela queima do calcário (principal matéria-prima), argila, óxidos de ferro e alumínio em forno rotativo em altas temperaturas. O processo de queima demanda alto consumo de energia térmica para aquecimento do forno rotativo (1450°C) e energia elétrica para a alimentação dos maquinários. A energia térmica é oriunda da queima de combustível e carvão, resultando em alta emissão poluente, além da etapa de calcinação do calcário que emite altas quantidades de gás CO₂ [1, 2].

Somado aos impactos ambientais proveniente da produção do cimento Portland e utilização de recursos naturais, os resíduos gerados nas obras também precisam de atenção devido à grande concentração de materiais descartados, que representa 60 a 70% de todo o lixo sólido urbano [3]. Estima-se que em algumas cidades do Brasil a produção de resíduo de construção civil (RCC) por ano seja de aproximadamente 500 kg por habitante, sendo o pequeno produtor o maior agente poluidor devido a sua falta de conhecimento sobre o descarte adequado dos materiais. As consequências do descarte inadequado destas ações causam diversos riscos e impactos socioambientais, como proliferação de doenças, obstrução de vias e logradouros, assoreamento de córregos e rios, custos de limpeza, entre outros [3].

Algumas soluções podem ser aplicadas a fim de minimizar os impactos gerados pelo setor da construção civil. Mediante a produção de concretos, a utilização de geopolímeros como material ligante demonstra benefícios ao meio

ambiente e maior preservação de recursos naturais, emitindo menor quantidade de CO₂ quando comparado com a produção do cimento Portland, além de possibilitar o uso de diversos materiais como matéria-prima, exemplo o metacaulim, rejeitos da indústria (cinza volante), escoria de alto forno e outros materiais que são fonte de alumínio e silício [4, 5]. Se tratando dos resíduos de construção civil, a reciclagem é a principal solução, a qual preserva recursos naturais, e permite a reutilização dos materiais resultantes, como brita, blocos, areias, entre outros [6].

Dentre as várias aplicações que ocorrem no setor da construção civil, os pavimentos intertravados estão em contínuo crescimento no mercado). Para esse tipo de pavimento, faz-se o uso de peças de concreto pré-moldadas, que são aplicadas como revestimento com uma camada de areia, onde o travamento das peças é feito através de contenção lateral e atrito entre as peças. Esse tipo de pavimento vem sendo bastante utilizado em ruas, praças e pisos industriais [7, 8].

Diante disso, esse projeto tem como proposta fornecer sustentabilidade na construção de pavimentos intertravados, substituindo o cimento Portland utilizado na produção de concretos por um ligante geopolimérico obtido a partir do metacaulim como fonte de alumínio e silício. Além disso, este projeto visa de forma ecológica a substituição do agregado graúdo convencional utilizado na produção de concretos para pavimentos intertravados por resíduos da construção civil provenientes de cerâmicas vermelhas, como tijolos e telhas que são descartados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este projeto de dissertação teve como objetivo o desenvolvimento de pavimento intertravado de matriz geopolimérica composta por metacaulim e hidróxido de sódio e agregados provenientes do reaproveitamento de resíduos da construção civil.

2.2 Objetivos Específicos

Para avaliar as propriedades de pavimentos intertravados compostos por geopolímeros a partir do metacaulim, foram executadas as seguintes etapas, como:

- Análise da composição química e mineralógica do metacaulim e ajuste granulométrico do RCC proveniente de cerâmicas vermelhas e o agregado convencional que foram utilizados como agregado graúdo.
- Análise da influência do tipo de metacaulim empregado e do tempo de calcinação do metacaulim nas propriedades finais do material produzido.
- Avaliação das características físico-mecânicas de corpos de provas preparados a partir de diferentes composições de ligante/agregado.
- Avaliação comparativa do efeito do envelhecimento acelerado na absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente, resistência mecânica e microestrutura dos corpos de prova com diferentes agregados.
- Avaliação dos resultados obtidos com os valores exigidos por norma para pisos intertravados de cimento Portland com agregados basálticos (ABNT NBR 9781: 2013).

Por meio das análises comparativas, esperava-se obter uma composição de ligante e agregado, que pudesse servir como alternativa às peças comerciais a base de cimento Portland, e assim minimizar o impacto ambiental gerado na fabricação do cimento e no descarte dos resíduos da construção civil.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Pavimento intertravado

O pavimento intertravado é constituído de peças de revestimento assentadas em uma camada de areia, onde a contenção lateral e o atrito entre as peças resultam no travamento delas (Figura 3.1). Atualmente peças de concreto pré-fabricadas são utilizadas com maior frequência como revestimento, aplicação na qual já foram utilizados diversos outros tipos de materiais ao longo dos anos [7].



Figura 3.1 – Pavimento intertravado de peças de concreto pré-fabricadas [7].

A construção de pavimentos intertravados é explorada a séculos, devido a necessidade de vencer grandes distâncias, construindo trilhas, caminhos e atalhos. Os Etruscos foram pioneiros desse tipo de construção, e revestiram caminhos entre vilas e colônias utilizando pedra de mão e preenchendo as juntas entre as pedras com um material mais fino, tornando o caminho mais plano e garantindo mais segurança, conforto e resistência nos transportes de cargas e pessoas. Os Romanos utilizaram essas construções para expandir o império, os solos arenosos dos caminhos mais longo eram revestidos com pedras naturais do tipo seixo rolado e, para as ruas mais solicitadas, o revestimento era feito manualmente com pedras talhadas em formatos poligonais e retangulares [9].

Nessa época os Romanos já demonstravam preocupações com a resistência estrutural dos pavimentos, classificando os tipos de areia que seriam utilizadas como base para os revestimentos de pedras. As areias eram classificadas entre as advindas do solo natural, de rio e de extração de canais, resultando em um tipo de argamassa proveniente da mistura entre os diferentes tipos de areia e teores de cal ou calcário, adicionando posteriormente o seixo rolado ou pedras de mão [9].

Devido à crescente demanda e aumento nas cargas transportadas houve a necessidade de utilizar revestimentos mais resistente nos caminhos ao longo dos anos. Diante disso, os materiais de revestimentos para pavimentos intertravado sofreram evoluções, sendo utilizado, por exemplos: blocos de argila, pedras talhadas e aparelhadas, madeira e peças de concreto pré-fabricadas [10].

- Blocos de argila: Relatos indicam a utilização desse tipo de material há 5.000 anos na Mesopotâmia, juntamente com o uso de betume. Os blocos de argila eram aplicados sobre uma camada de betume, proporcionando maior aderência, porém a baixa resistência mecânica dos blocos limitava o uso. Com a utilização de fornos para queima de argila, os blocos passaram a ter elevada resistência mecânica e foram utilizados na América e Europa no final do século XIX [11].

- Pedras talhadas e aparelhadas: A utilização desse tipo de material é mais conhecida em pavimentos de paralelepípedos, onde o formato das pedras é de aproximadamente 20 cm de comprimento, 12 cm de largura e 20 cm de altura, com juntas entre as pedras de até 2 cm e assentadas sobre uma camada de areia espessa. Na época da colonização do Brasil, os portugueses utilizaram esse tipo de material, fazendo o uso de pedras com dimensões irregulares de até 50 cm, arrumadas naturalmente sobre o terreno [12].

- Blocos de madeira: A aplicação dos blocos de madeira em pavimentos foi devido a necessidade de reduzir os ruídos gerados pelas carruagens com rodas de ferro, que eram utilizadas no início do século XIX. Os blocos tinham dimensões entre 7,5 a 10 cm de largura e 12,5 a 25cm de comprimento. Esse tipo de material foi descartado a partir da utilização de automóveis com pneus de borracha [12].

- Peças de concreto pré-fabricado: O desenvolvimento dos pavimentos intertravados utilizando peças de concreto evoluiu em todo o mundo a partir do final da década de 1970. A alta resistência mecânica das peças, facilidade e possibilidade de fabricação em diversos formatos e dimensões favorecem aplicações em: calçadas, ruas, praças, caminhos, pisos industriais, rodovias e até mesmo aeroportos. As peças de concreto são assentadas sobre uma camada de areia e travadas entre si por contenção lateral [8, 13].

3.1.1 Características dos pavimentos intertravados de peças de concreto pré-fabricados

A fabricação de pavimentos intertravados utilizando peças de concreto pré-fabricados deve atender alguns aspectos de uso quando se refere a ambientes externos, como: intempéries, abrasão, tráfego de pedestres e cadeirantes. Portanto o pavimento deve apresentar algumas características [13]:

- Resistencia e durabilidade: apresentar resistência adequada para suportar as solicitações demandadas na utilização.
- Diversidade de cores: possibilidade de fabricação de peças em várias cores, que possibilita a demarcação de áreas e caminhos.
- Superfície antiderrapante: proporcionar segurança aos usuários, em condições de pisos seco e molhado.
- Conforto térmico: peças mais claras proporcionam menor absorção de calor, resultando em maior conforto térmico. As juntas entre as peças facilitam dissipação do calor, assim como também a liberação por parte da umidade absorvida.
- Liberação ao tráfego: utilização imediata após a finalização da compactação do pavimento.
- Produto ecológico: por ser um produto com base cimentícia, podem ser reciclados ou reutilizados, evitando o acúmulo de resíduos em aterros e preservando recursos naturais de jazidas de calcário.

3.1.2 Formato e dimensões das peças de concreto para pavimentação

As peças de concreto pré-fabricadas para aplicação de pavimentos intertravados podem ser produzidas em diversos formatos, estes são agrupados em tipo I, II, III e IV. As Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 ilustram o formato de cada tipo de agrupamento. [13, 14].

- Tipo I: Formato próximo a um retângulo, onde a relação comprimento/largura é igual a dois, arranjados entre si nos quatro lados. Os arranjos podem ser assentados como fileiras ou espinha de peixe. Usualmente as dimensões são 20 cm de comprimento e 10 cm de largura, onde as faces laterais podem ser retas, poliédricas ou curvilíneas.

- Tipo II: Formato único, possui dimensões usuais de 20 cm de comprimento e 10 cm de largura, cujo assentamento é realizado em fileiras.

- Tipo III: Formato geométrico como hexágonos, triedros e trapézios, com peso superior 4 kg. As dimensões são no mínimo 20 cm por 20 cm.

- Tipo IV: Conjunto de diferentes tamanhos de peças, ou único tamanho de peça com juntas falsas, que podem ser assentadas em mais de um arranjo.

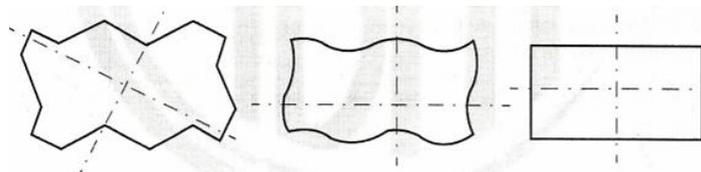


Figura 3.2 - Peças de concreto pré-fabricadas do tipo I [14].

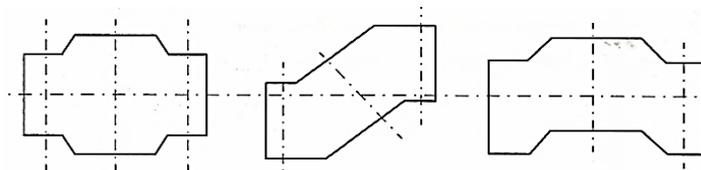


Figura 3.3 - Peças de concreto pré-fabricadas do tipo II [14].

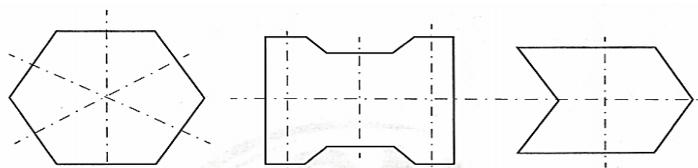


Figura 3.4 - Peças de concreto pré-fabricadas do tipo III [14].

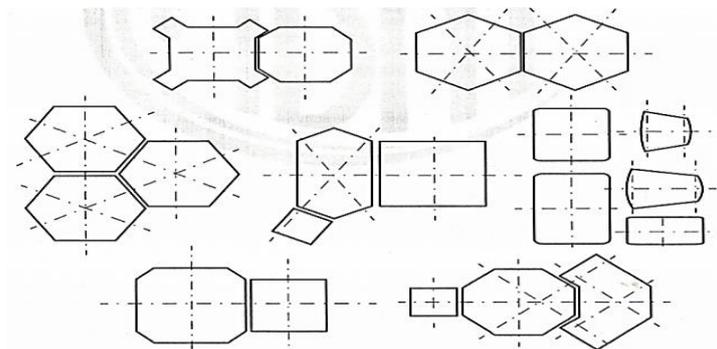


Figura 3.5 - Peças de concreto pré-fabricadas do tipo IV [14].

3.1.3 Processo de fabricação das peças de concreto para pavimentação

A fabricação das peças de concreto para aplicação em pavimentos intertravas podem ser de três tipos distintos, tais como: peças prensadas, dormidas e viradas [15].

- Peças Prensadas: A produção é mecânica, o concreto utilizado deve apresentar consistência seca para poder ser adensado com alta pressão e sob constantes vibrações (vibroprensas hidráulicas ou mecânicas). Esse processo apresenta maior controle da produção, resultando em maior homogeneidade das peças. Atualmente é o processo mais utilizado no mundo, proporcionando maiores variedades de formatos e cores.

- Peças dormidas: Utiliza-se concreto com consistência plástica que é vertido manualmente nos moldes e adensado através de uma mesa vibratória, onde a desmoldagem da peça é feita apenas no dia seguinte e diante disso apresenta baixa produtividade. Esse processo resulta em menor consumo de cimento, devido a possibilidade da execução em duas camadas (uma externa para acabamento e uma interna priorizando o máximo de agregado graúdo). As características dos moldes utilizados nesse processo resultam em peças com

superfícies extremamente lisas e, diante dessa característica as peças não proporcionam bom intertravamento devido à ausência de aderência entre elas, sendo necessário uma base bem executada para que o intertravamento seja suficiente através da aderência entre a base e a peça.

- Peças viradas: Os moldes são preenchidos manualmente com o concreto e são adensados através de uma mesa vibratória, sendo desmoldados logo em sequência em uma superfície plana e lisa. Devido à rápida desforma apresentado no processo, deve-se utilizar concreto em umidade ótima, evitando possível ocorrência de esfarelamento das peças quando utilizado mistura muito seca e perda de forma quando utilizado mistura muito mole. Esse processo apresenta possibilidade de preenchimento em duas camadas, conforme mencionado no processo de peças dormidas e diante disso resulta em menor consumo de cimento. Por ser um processo manual, possui baixa produtividade.

De acordo com Pirola [16] o processo de fabricação por peças prensadas, neste caso utilizando vibroprensas resultam em peças com maior resistência mecânica quando comparado aos demais métodos de fabricação. Segundo o autor o tempo de alimentação e de vibrocompressão são significativos para a resistência final das peças, uma vez que o aumento deste tempo resulta em maior quantidade de concreto despejado na forma devido a redução do volume de vazios ocasionado pela vibração e compressão do concreto.

Para este trabalho adotou-se o método de fabricação por peças dormidas, visto que os equipamentos utilizados são mais simples, suficientes e oferecem praticidade para a preparação de amostras de dimensões mais reduzidas comparadas às dimensões das peças comerciais.

3.2 Cimento Portland

O cimento Portland foi descoberto em 1824 por Joseph Aspdin [17], ao qual o nome dado é devido as características semelhantes encontradas nas rochas da ilha britânica de Portland. É caracterizado como um pó fino que apresenta propriedades ligantes que ao misturar com a água resulta em endurecimento após a secagem. Para a produção do cimento Portland é necessário a extração de matéria-prima, queima e adições de minerais [17].

A principal matéria-prima utilizada para fabricação deste produto é o calcário, extraído de jazidas naturais, o qual sofre redução de tamanho através da britagem para poder passar pelo processamento industrial. O mesmo ocorre para argila, outra matéria-prima utilizada para produção do cimento que requer uma desaglomeração. Posteriormente, estas são enviadas para o pré-homogeneizador que prepara as matérias-primas (calcário e argila) e são enviadas para o moinho cru, que as transforma em uma farinha e inicia a homogeneização. A farinha obtida vai para a queima (clínquerização), passando por uma zona de aquecimento (calcinação) e uma zona de elevada temperatura ($\sim 1450^{\circ}\text{C}$) onde ocorrem as reações e a formação do clínquer, que é um produto granular que pode receber adições como pozolana, gesso, calcário e escória. Após as adições é feito a moagem do cimento e encaminhado para os silos de cimento, pronto para o ensacamento e comércio [18].

O processo de fabricação do cimento Portland é demonstrado na Figura 3.6 [18].

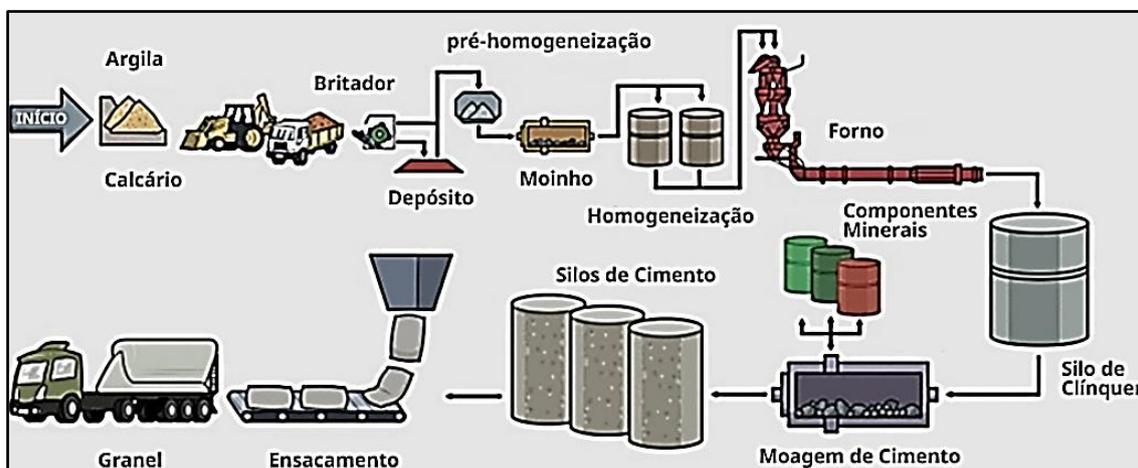


Figura 3.6 – Esquematização do processo de fabricação do cimento Portland [18]

Atualmente existem diferentes tipos de cimento Portland, todos indicados para uso na construção civil, porém algumas características os diferem, tornando-os específicos para determinadas aplicações. Os tipos de cimentos são: cimentos CP-I (comum), CP-II (composto), CP-III (alto forno), CP-IV

(pozolânico), CP-V ARI (alta resistência inicial), cimento RS (resistência a sulfatos), cimento branco (CPB) e cimento Portland de baixo calor de hidratação (BC). Os tipos de cimento CP-I, II, III e IV são comercializados em diferentes classes de resistências, tais como 25, 32 e 40 MPa. O cimento CP-II é o mais utilizado, representando aproximadamente 60% de todo o cimento consumido [19].

Os principais compostos químicos dos cimentos Portland são o silicato tricálcico (C₃S), silicato dicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) e ferro aluminato tetracálcico (C₄AF), estes responsáveis pela pega e endurecimento do cimento. A pega do cimento ocorre após alguns minutos de hidratação, tal resultado ocasionado pela hidratação dos aluminatos C₃A e C₄AF que formam etringitas C₆ASH₃₂ em formato de agulhas, conforme a Figura 3.7. Para os silicatos C₃S e C₂S a hidratação inicia a partir de algumas horas do início da hidratação do cimento, formando composição química variada de cálcio hidratado C-S-H e hidróxido de cálcio Ca(OH)₂ no formato prismático que preenchem os espaços das partículas e da água em dissolução, conforme a Figura 3.7. Portanto, o endurecimento progressivo do material é resultado da criação de ligações interpartículas ocasionado pelos aluminatos e silicatos hidratados [20].

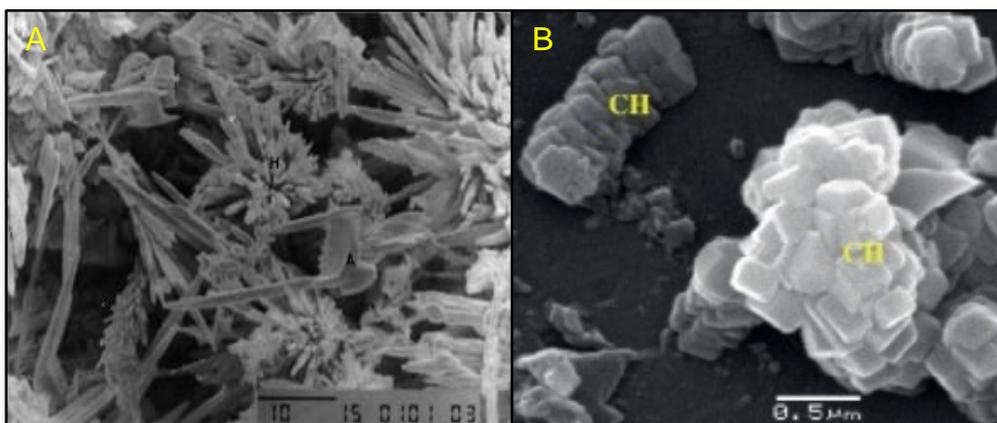


Figura 3.7 – Aluminatos e silicatos hidratados no cimento Portland: a) etringita C₆ASH₃₂; b) hidróxido de cálcio Ca(OH)₂ [20].

Diante disso, para este projeto utilizou-se o cimento Portland do tipo CP-V ARI, visto que o processo adotado para a fabricação das peças de pavimento intertravado foi por peças dormidas e, portanto, houve a necessidade do ganho de resistência rápido.

3.3 Agregados para concreto

O agregado é um material granular, em sua maioria das vezes inerte, que possuem propriedades e dimensões adequadas para preparação de argamassas e concretos [21]. Por longo tempo os agregados foram tratados apenas como materiais de preenchimento, porém atualmente considera-se a influência no comportamento estrutural do concreto [22].

3.3.1 Tipos de agregados

A origem dos agregados podem ser diversas, ao qual são classificados em naturais, artificiais, britados e reciclados [23].

- **Naturais:** São encontrados na natureza e podem ser utilizados após a lavagem. Os materiais classificados como naturais são pedregulhos, areia de cava, areia de rio, entre outros.

- **Artificiais:** Derivado de processos industriais, como exemplo a vermiculita expandida, argila expandida e folhelho expandido por tratamento térmico.

- **Britados:** Sofrem processo de cominuição (britagem) para adequar ao tamanho de agregado para uso em concreto. Exemplos desse material são pedriscos, pedra brita (comumente granito), pedregulho britado, entre outros.

- **Reciclados:** Rejeitos industriais granulares que apresentam propriedades ao uso como agregado, tais como escoria de alto forno e resíduos da construção civil.

Em função do tamanho dos agregados, são classificados em agregado miúdo e agregado graúdo, através do fracionamento granulométrico por peneiramento dos grãos. Diante disso, grãos peneirados que passam pela abertura de 4,75 mm são denominados agregados miúdo. Já os agregados graúdos são os grãos passantes pela abertura de 75 mm e são retidos na abertura 4,75 mm [21].

Os agregados também podem ser classificados de acordo com sua massa unitária em agregados leves, com massa unitária menor que 1120 kg/m^3 e agregados pesados, quando a massa unitária é maior que 2080 kg/m^3 . Grande parte dos agregados minerais naturais possuem massa unitária entre 1520 a 1680 kg/m^3 [22].

Para este projeto adotou-se a areia de rio com granulometria entre $0,075$ mm a $1,2$ mm como agregado miúdo e o pedrisco do tipo basalto e resíduos da construção civil com granulometria entre $4,8$ mm a $9,5$ mm como agregados graúdo.

3.3.2 Agregados reciclados de resíduos da construção civil

Resíduos de construção e demolições podem contribuir para o desenvolvimento sustentável por meio da reciclagem, minimizando o volume de resíduos descartáveis e o consumo de matéria-prima não renovável, que possibilita reduzir os impactos ambientais gerados tanto pelos descartes inadequados quanto pela extração de recursos naturais [6]. Quanto aos descartes inadequados, o acúmulo desses resíduos são oriundos da deficiência no processo da construção, como falha na elaboração do projeto e execução, má qualidade dos materiais, perdas de armazenamento e transporte, utilização inadequada por parte do usuário, além dos resíduos gerados em reformas ou reconstrução [24].

O setor da construção civil é bastante versátil quanto a reutilização dos resíduos gerados, sendo que os materiais reaproveitados ou reciclados podem ser utilizados para produção de outros materiais, como: blocos, tubos de drenagem, componentes construtivos de uso em pavimentação, uso em concreto, argamassa, entre outros [6]. Diante de diversas possibilidades de materiais que podem ser feitos por meio da reciclagem dos resíduos da construção civil (RCC), a qualidade e características dos agregados reciclados, deve-se adequar à finalidade específica do material destinado, assim a granulometria das partículas deve ser ajustada e os RCC devem apresentar níveis mínimos toleráveis de contaminação, resultando em um material que apresente maior estabilidade nas estruturas construídas [10].

Um estudo realizado por Ângulo e Figueiredo [25] relata que a principal diferença entre o concreto convencional e o concreto produzido a partir de agregados reciclados refere-se à porosidade, a qual nos agregados reciclados ultrapassa os 10%. Ainda segundo o estudo, dentre os diversos tipos de materiais encontrados nos RCC a cerâmica vermelha (tijolos, telhas, lajotas) é o material que possui maior porosidade, podendo ter a absorção de água de até 24%.

Segundo Lima [26], o estudo da absorção de água dos agregados provenientes de resíduos é uma das características mais importante para diferenciar o agregado reciclado do natural, já que esses resíduos são compostos de materiais porosos, o que leva a materiais com densidades menores do que os materiais naturais na maioria das vezes. Diante disso, Leite [27] afirma que a absorção de água por parte dos resíduos quando utilizados como agregados gráudo e/ou miúdo, interfere diretamente na relação água/cimento do concreto a ser produzido e, conseqüentemente, na resistência mecânica.

Neville [28] relata que a porosidade presente nos agregados influencia em propriedades como resistência à abrasão do concreto, estabilidade química e aderência do agregado a matriz cimentícia hidratada, como também a rápida absorção de água dependendo do tamanho dos poros.

Estudos realizados por Cabral [29] e Leite [27] indicam que o RCC quando utilizado possui influência direta na resistência final do concreto devido a vasta variedade de materiais que podem fazer parte destes resíduos e, quando utilizado como agregado gráudo pode comprometer significativamente a resistência final do deste concreto.

Stroher [30] realizou substituições parciais do agregado gráudo convencional por RCC obtido a partir de materiais cerâmicos, sendo relatado que o aumento de RCC como substituto ao agregado gráudo convencional comprometeu a resistência mecânica final do concreto. A substituição de 50% do agregado gráudo por RCC levou a perda de aproximadamente 31,4% da resistência à compressão aos 28 dias quando comparado ao concreto contendo 100% de agregado convencional. Resultados semelhantes foram encontrados

por Filho et al [31] que substituiu o agregado graúdo por 30% de RCC proveniente de tijolos cerâmicos, sendo identificado a queda da resistência do concreto em 36,26%.

Santos et al. [32] utilizou o RCC obtido a partir de argamassas cimentícias como substituto parcial ao agregado convencional. Através da substituição mais crítica, neste caso 50% de RCC, obteve resistência à compressão aproximadamente 20,5% inferior a composição com 100% de agregado convencional. Comparado ao estudo realizado por Stroher [30] e Filho et al. [31], fica evidente que o tipo de material utilizado como RCC tem influência significativa na resistência à compressão conforme mencionado por Cabral [29] e Leite [27].

Portanto, para este projeto foi utilizado o RCC proveniente de cerâmicas vermelhas, como tijolos e telhas cerâmicas, que proporcionou melhores condições de seleção durante esta etapa, comparado a rebocos, blocos de cimento e restos de concreto.

3.4 Geopolímeros

Os geopolímeros são materiais poliméricos inorgânicos de origem mineral, formados pela polimerização de matérias-primas de origem geológica compostos por aluminossilicatos, onde o processo de polimerização produz uma ligação polimérica Si-O-Al-O-Si resultante da reação química dos minerais com um ativador em condições altamente alcalinas. Do ponto de vista microscópico, estes materiais possuem estrutura similar aos polímeros orgânicos comuns, ou seja, a estrutura contém longas cadeias com elementos que se repetem no decorrer da estrutura. Conseqüentemente, os geopolímeros possuem propriedades para serem utilizados como ligante ou cimento, cuja cura ocorre em temperaturas inferiores a 100°C [33, 34].

A síntese de geopolímeros necessita de uma solução escolhida (solução ativadora) e uma fonte de silício e alumínio que é transformada em precursor geopolimérico. Os materiais que se destacam como fontes de silício e alumínio são cinza volante, metacaulim e escoria de alto forno [35, 36].

Os aluminossilicatos utilizados podem ser encontrados em compostos pozolânicos (naturais ou artificiais) ou em fontes de íons de alumínio e silício que são dissolvidos sem dificuldades em solução ativadora. Para pozolana artificial, a atividade pozolânica é adquirida a partir de processos externos, como exemplo o metacaulim que é obtido pela ativação térmica de argilas cauliníticas, assim como também subprodutos e resíduos industriais que são obtidos pelo processo térmico junto de um resfriamento abrupto, como é o caso das escórias e cinzas volantes. As soluções alcalinas responsáveis pela ativação podem ser de diversos tipos, destacando as soluções de hidróxidos alcalinos e mistura de solução de silicato alcalino com hidróxido alcalino [5, 37, 38].

Para que ocorra a geopolimerização, a solução alcalina é adicionada ao aluminossilicato, formando rapidamente uma pasta geopolimérica, não havendo tempo para formação de estrutura cristalina. Os geopolímeros são análogos as zeólitas por apresentarem química similar, porém suas estruturas internas os diferenciam, uma vez que as zeólitas possuem estrutura cristalina enquanto os geopolímeros são predominantemente amorfos [35].

As propriedades apresentadas pelos geopolimeros podem ser de grande interesse ao setor industrial e se destacam pela alta resistência à compressão e flexão em idades iniciais e finais do endurecimento, resistência ao ataque químico, resistência a altas temperaturas (estabilidade até 1250°C) como também isolamento térmica, além de outras importantes propriedades para aplicações específicas [39].

3.4.1 História dos Geopolímeros

Esse tipo de material foi relatado cientificamente pela primeira vez na década de 1970 por Joseph Davidovits [33] quando houve a necessidade de obter materiais resistentes ao fogo e não inflamáveis. Joseph Davidovits [40] relata que a geopolimerização é uma variação adaptada de processos apresentados pelos antigos povos Romanos e Egípcios na estabilização de solos lateríticos com cal ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$) ou solos cauliníticos. Estudos realizados por Joseph Davidovits [41] apontam que as pirâmides do Egito foram construídas há 4.500 anos com blocos desse tipo de material, como também outros

monumentos históricos presentes na Grécia, Chipre e Itália e assim demonstrando a extrema durabilidade desses materiais que estão presentes até os dias de hoje.

Em relação às pirâmides do Egito, estudos químicos e mineralógicos [41] apontaram que os blocos utilizados são de pedregulhos de calcário caulínico oriundos de Gizé misturado com NaOH, fabricado *in situ* por mistura de água, cal ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$) e barrilha (Na_2CO_3). Análises de difração de raios X realizadas em amostras retiradas dos blocos das pirâmides de Chefren, Cheops, Sneferu e Teti indicam que a fase cristalina predominante é a calcita (CaCO_3), porém um material criptocristalino (zeólita do tipo analcima) $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e um material amorfo constituído por silicatos e aluminossilicatos complexos também fazem parte da microestrutura [33].

3.4.2 Processo de síntese de geopolímeros

O nome geopolímero representa dois termos distintos, “geo” que simboliza a semelhança aos materiais geológicos e “polímeros” devido a química dos sílico-aluminatos. Geopolímeros são conhecidos também como polissialatos, sendo o termo sialato uma abreviação de sílico-óxido-aluminato.[42].

Os polissialatos são constituídos de cadeias poliméricas de Si^{4+} e Al^{3+} (tetraedros de silicato SiO_4 e aluminato AlO_4) ligados aleatoriamente por meio do compartilhamento de oxigênio, formando número de coordenação IV. Íons cátions alcalinos (K^+ , Na^+ , Li^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ , Ba^{2+}) neutralizam o sistema, balanceando as cargas negativas devido à substituição do silício pelo alumínio. A Equação 3.1 ilustra a fórmula empírica para os polissialatos, onde M é o íon cátion, n o grau de polimerização, w o grau de hidratação e z sendo 1,2 ou 3 [43].



A estrutura presente nos polissialatos é representada na Figura 3.8, que retrata polímeros naturais formados pela reação geossíntese. A geossíntese induz o Al por ativação alcalina em estrutura composta por matriz silicosa. Diante disso ocorre o arranjo tridimensional, compartilhando os oxigênios e alternando

os átomos de Si com os de Al em coordenação tetraédrica, formando diferentes arranjos de acordo com a razão Si/Al [43,44].

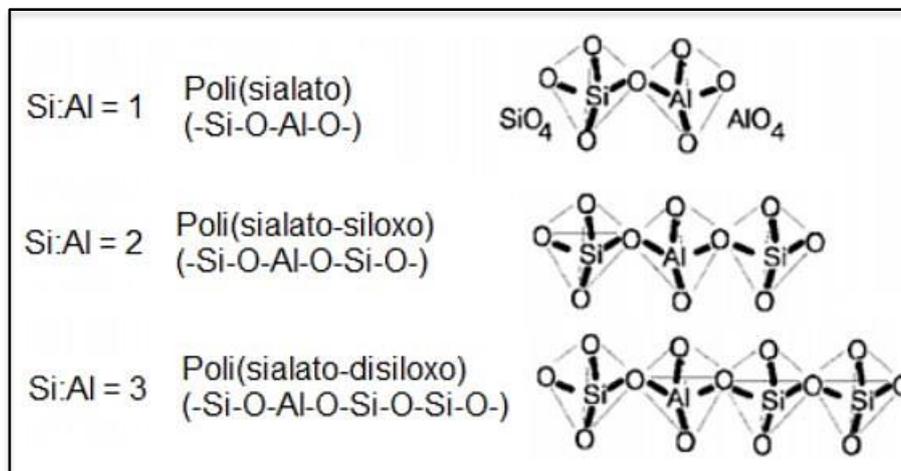


Figura 3.8 – Estrutura dos polissialatos [45].

Na década de 1950 foi proposto por Glukhovsky [46] um mecanismo geral que representa a ativação alcalina de materiais contendo sílica e alumina. O mecanismo resume em três estágios distintos, sendo: destruição-coagulação; coagulação-condensação e condensação-cristalização. Posteriormente o mecanismo foi detalhado por Duxson et al [47], representado na Figura 3.9, ao qual descreve um mecanismo de reação simplificado para a geopolimerização por meio dos principais processos que levam a transformação de aluminossilicato em aluminossilicato alcalino sintético.

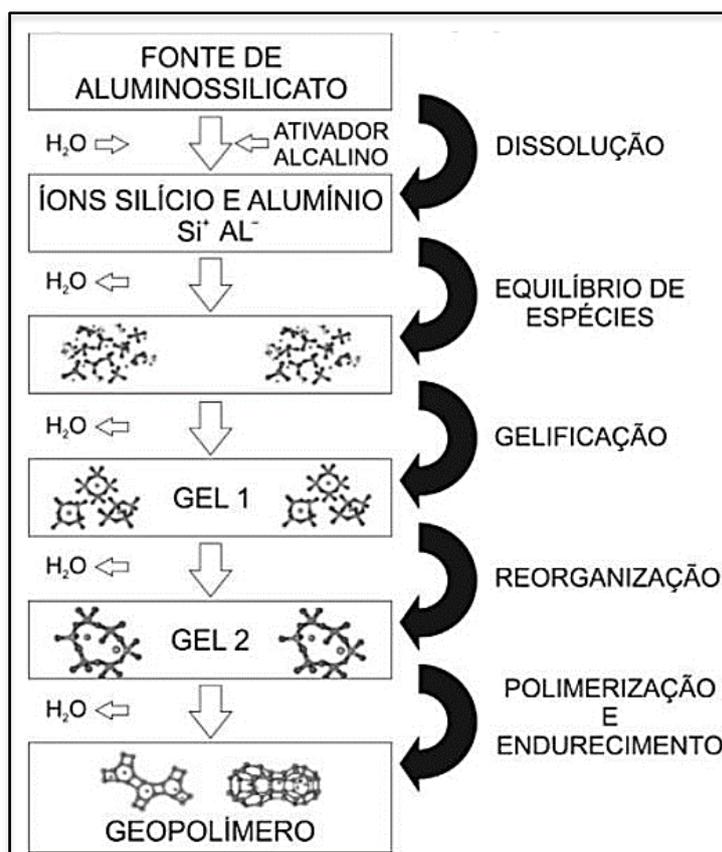


Figura 3.9 – Processos da geopolimerização [47]

O processo de dissolução da fonte de aluminossilicato por hidrólise alcalina forma espécies de silicato e aluminato em solução (provavelmente em forma monomérica). Aluminossilicatos amorfos em soluções ativadoras de pH mais elevado (acima de 12) são dissolvidos rapidamente, criando uma solução supersaturada de aluminossilicato [47].

Posteriormente, a gelificação inicia-se através das pequenas moléculas que se aglutinam para formar moléculas maiores, precipitando em forma de gel e sendo possível notar um pequeno grau de ordem estrutural (precipitação polimérica). Anéis compostos de quatro unidades tetraédricas secundárias são formados a partir de tetraedros de SiO_4 e AlO_4 , em que os cátions responsáveis pela neutralização da carga elétrica ficam posicionados nas aberturas deixadas na estrutura, devido a substituição de um silício com um tetraedro de alumínio. [48, 49, 50]. Essa reação contém alta taxa de alumínio, já que as ligações de Al-O são mais fracas em comparação as ligações de Si-O, o que leva ao favorecimento da dissolução mais rápida do alumínio e diante disso uma alta

concentração de íons de Al^{3+} nas primeiras horas de reação [49, 51]. A água consumida durante a dissolução é liberada neste processo, uma vez que a água possui o papel de meio de reação que reside dentro dos poros do gel. A estrutura desse tipo de gel é referida comumente como bifásica, onde as duas fases são formadas pelo ligante de aluminossilicato e a água [47].

Após a gelificação, inicia-se a etapa de reorganização através do avanço da reação, onde, as ligações de Si-O se dissolvem e aumenta a conectividade da rede do gel, levando a formação de rede tridimensional de aluminossilicatos [48, 50]. Por fim, o endurecimento do gel para formação do geopolímero pode ocorrer através da lixiviação e difusão entre o gel e as partículas, ocorrendo o endurecimento apenas quando o gel formado estiver completamente condensado e assim a porosidade apresentar forma distribuída e uniforme [52].

Para o início do endurecimento, normalmente leva-se aproximadamente 90 minutos e ocorre o endurecimento da matriz em aproximadamente 4 horas, o que impede a formação de estrutura cristalina. O tempo de endurecimento é variável de acordo com as condições de processamento e a matéria-prima utilizada [53].

3.4.3 Precursores geopoliméricos

Para produção de geopolímeros utiliza-se aluminossilicatos como precursores em dissolução em uma solução alcalina. Os precursores podem ser compostos do tipo pozolânico (naturais ou artificiais), tais como cinza volante e escória de alto-forno, ou outras fontes de íons de alumínio e silício, desde que estes consigam se dissolver na solução alcalina de maneira fácil [5].

O primeiro precursor utilizado para produção de geopolímeros foi o metacaulim, que pode ser obtido pela calcinação da caulinita em temperatura controlada. Atualmente o metacaulim é o precursor mais utilizado em geopolímeros, já que possui alta taxa de dissolução em meio alcalino e proporciona maior facilidade no controle da relação SiO_2/Al_2O_3 [35, 54].

A cinza volante é um resíduo industrial proveniente da queima do carvão mineral, disponível em diversas regiões do mundo. Usinas termoelétricas são grandes fontes desse precursor, pois utiliza-se a queima de carvão mineral para

gerar energia. A sua coleta é feita através de filtros ou precipitadores eletrostáticos, pois as partículas finas são transportadas junto com os gases de combustão. Devido ao formato esférico das partículas, a cinza volante é bastante utilizada como adição mineral, resultando em melhor trabalhabilidade em misturas cimentícias. Porém, esse precursor apresenta dificuldade em relação ao controle da composição química, já que a qualidade da cinza depende da condição de queima da usina e do tipo e qualidade do carvão a ser queimado [54, 55].

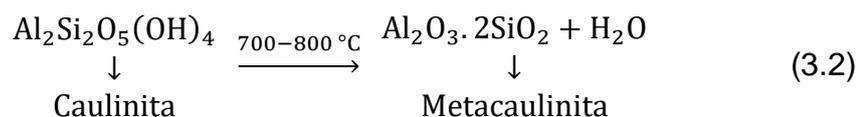
A escória de alto forno é gerada durante fabricação do ferro gusa, por meio da combinação química das impurezas do minério de ferro com dolomita, calcário e as cinzas de carvão mineral. Com o decorrer da fabricação do ferro gusa, a escória de alto forno flutua no topo do ferro fundido, fazendo a proteção do mesmo contra reoxidação. A escória de alto forno após ser separada do ferro é direcionada a recipientes e feito o resfriamento, onde o tipo de resfriamento resulta em diferentes tipos de escória [56]. Quando a escória de alto forno é resfriada rapidamente não há tempo suficiente para formação de cristais, solidificando-se em forma granular e amorfa, possibilitando seu uso na produção de cimento. Resfriamento demorado resulta na solidificação e obtenção de um material cristalino, podendo este ser utilizado como material inerte [57].

3.4.3.1 Metacaulim

O metacaulim é um material pozolânico, predominantemente amorfo que apresenta rede atômica com pouca ou nenhuma organização cristalina. A produção é feita pelo processo de calcinação controlada do argilomineral caulinita, principal constituinte do caulim. Sua composição é aproximadamente 40% de alumina (Al_2O_3) e 52% de sílica (SiO_2), com possibilidade de conter outros óxidos, tais como: Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , entre outros presentes em fases minerárias secundárias [58, 59].

O processo de calcinação é feito em várias faixas de temperatura, onde normalmente o metacaulim é obtido na temperatura entre 700°C a 800°C , podendo chegar até 900°C dependendo da composição da caulinita. Acima dessa temperatura ocorre a formação de uma nova estrutura cristalina, espinélio

e mulita. O espinélio é formado em temperatura próxima de 950°C e a mulita a partir de 1100°C [60, 61]. A etapa de ativação térmica durante a calcinação da caulinita resulta na eliminação de hidroxilas através da perda de água da estrutura cristalina caulinita, assim obtendo o metacaulim, como ilustrado na Equação 3.2 [62].



Caulinitas com quantidades maiores de defeitos na estrutura cristalina resulta em maior facilidade na perda de água de estrutura (desidroxilação) quando comparado a caulinitas com maior grau de cristalinidade, permitindo a produção de pozolâna com alta reatividade a menores temperaturas. Diante disso, do ponto de vista industrial, a utilização de caulinita com menor cristalinidade para a produção de metacaulim é bastante vantajosa, já que apresenta menor consumo energético [63].

Walters e Jones [64] afirmaram que argilas caulinitas com teores de até 10% de fases cristalinas, como mica e quartzo, não influenciam significativamente na resistência à compressão dos materiais obtidos a partir destas matérias primas.

De acordo com Souza [65], a resistência à compressão dos materiais geopoliméricos compostos por metacaulim apresentam variações de comportamentos devido as características do precursor. Metacaulins compostos por grande quantidade de fases cristalinas, como no caso de quartzo e mica, induzem em menor velocidade da reação de geopolimerização, uma vez que o material cristalino é inerte a reação e atuará como material de enchimento.

Santa [66] relatou em seu estudo a importância das fases que compõem a microestrutura dos geopolimeros obtidos a partir de metacaulim e sua influência nos resultados de resistência à compressão. É mencionado que as composições com maior cristalinidade na microestrutura geopolimérica resultaram em menores valores de resistência a compressão, aproximadamente 1 MPa para a composição analisada com maior cristalinidade. Ozer e Uzun [67]

confirmaram estes resultados por uma análise de MEV e observaram a formação de fases zeolíticas juntamente com material amorfo, que provavelmente é resultado do metacaulim que não reagiu ao processo de geopolimerização.

As partículas de metacaulim geralmente são menores que as de cimento Portland, com dimensões entre 1,5 a 5 μm e apresentam coloração branca, tal cor podendo sofrer alterações em função da composição do material, como é o caso de metacaulim compostos por óxidos corantes (ferro e titânio) [68]. A área de aplicação do metacaulim é bastante vasta, destacando sua utilização como filler pozolânico em concretos, componente em concretos de alto desempenho e cimento geopolimérico [60].

A adição de materiais pozolânicos em matriz cimentícia resulta em reação pozolânica devido à interação com o hidróxido de cálcio, modificando a matriz cimentícia e formando aluminatos de cálcio hidratado (C_2ASH_8 , C_4AH_{13} e C_3AH_6) e silicatos (C-S-H). Características como resistência mecânica e porosidade são melhoradas quando adicionado metacaulim em matrizes cimentícias, o que proporciona maior durabilidade na aplicação final do material. A possibilidade do metacaulim atuar como microfiller é devido à presença de partículas extremamente finas e com alta área específica [69, 70, 71].

Diante disso, este estudo analisou como precursor geopolimérico o metacaulim, visto que é o precursor mais comum empregado para este processo, além de ser um material comercial, que o torna de fácil acesso para realização do trabalho.

3.4.4 Soluções ativadoras

A solução ativadora é responsável pelo controle dos mecanismos iniciais da reação, fazendo a dissolução da alumina e sílica do precursor, sendo um dos fatores mais importante para a geopolimerização. Para a ativação do alumínio e silício presente no precursor é necessário um meio altamente alcalino (solução ativadora), a qual permite uma estrutura vítrea se transformar em um material compacto [5, 37].

As soluções ativadoras podem ser classificadas em diversas formas, tais como: hidróxidos de metais alcalinos (MOH), silicatos ($\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_3$), aluminatos

($M_2O \cdot nAlO_3$), aluminossilicatos ($M_2O \cdot nAl_2SO_3 \cdot (2-6) SiO_2$), sais de ácidos fracos (M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF), e sais de ácidos fortes (M_2SO_4), sendo M representado por qualquer metal alcalino [72]. Destaca-se como as mais utilizadas os hidróxidos de metais alcalinos ou também uma combinação de silicato com hidróxido de metal alcalino, podendo ser utilizado qualquer metal da família IA, embora os hidróxidos de Sódio (NaOH) e hidróxidos de Potássio (KOH) sejam os mais utilizados. A solução de silicato tem o objetivo de complementar a quantidade de silício, chegando as proporções necessária de SiO_2/Al_2O_3 e, assim, atendendo reações de geopolimerização e as propriedades desejadas [35, 37].

Segundo Provis et al [73], além do auxílio do silício proporcionado pelo silicato na relação desejada de Si/Al, os ativadores compostos por silicatos auxiliam na dissolução do silício e aceleram o processo de geopolimerização, permitindo a solidificação mais rápida e o aumento de resistência mecânica. Komnitas e Zaharaki [74] ressaltam que quanto mais silicato na composição do ativador alcalino maior será a resistência mecânica, porém em quantidade excessiva afeta a trabalhabilidade do geopolímero.

O desenvolvimento microestrutural do sistema é afetado pelo tipo do cátion de hidróxido que é envolvido na reação. Geopolímeros produzidos a partir do potássio possui maior resistência à compressão do que aqueles produzidos com sódio, aumento de aproximadamente 42%, pois o íon K^+ causa maior desordem na fase gel. Porém, os hidróxidos de potássio apresentam maior dificuldade para dissolver os aluminossilicatos quando comparado aos hidróxidos de sódio [75, 76].

Na geopolimerização a concentração do ativador alcalino é de extrema importância, pois uma maior concentração deste componente resulta em aumento da velocidade de reação e obtenção de um material mais resistente e menos poroso. Diante disso, o aumento da concentração do íon do hidróxido resulta em maior solubilidade do aluminossilicato. Materiais produzidos a partir de hidróxido de sódio (NaOH) ganham resistência conforme o aumento da concentração do ativador alcalino. Para o hidróxido de potássio (KOH) o

aumento da resistência à compressão possui um limite de concentração, após isso o efeito é reverso, resultando em menor resistência [5, 77, 78].

Para este trabalho foi utilizado como solução ativadora o hidróxido de sódio em concentração de 12 mols/l, visto que a literatura aponta como a solução mais usual e apresenta resultados satisfatórios com esta concentração.

3.4.5 Razão Molar SiO₂/Al₂O₃

Um outro parâmetro também importante para a sintetização de um geopolímero é a razão atômica de silício e alumínio ou a razão molar entre sílica e alumina. Essa relação é fundamental, pois afeta diretamente a dissolução e reação de condensação dos geopolímeros, assim, maior dissolução resulta em maior disponibilidade de alumínio e silício na reação química e a reação de condensação está relacionado com as reações finais do produto. Diante disso a razão entre SiO₂/Al₂O₃ influencia diretamente nas características finais dos geopolímeros e, conseqüentemente, a sua aplicação [79, 80].

Pode-se notar que o aumento do teor de Al₂O₃ resulta em menor razão SiO₂/Al₂O₃ e, portanto, obtém-se geopolímeros com menor resistência [81]. Vale ressaltar que tanto o precursor quanto o ativador alcalino podem ser fontes de SiO₂ e Al₂O₃ para satisfazer a razão molar [82].

A aplicação dos materiais geopoliméricos baseia-se em função da razão molar SiO₂/Al₂O₃ ou razão atômica de Si/Al, que proporcionará diferentes propriedades conforme a variação dessas relações. A Figura 3.10 proposta por Davidovists [45] ilustra as aplicações de materiais geopoliméricos de acordo com a razão atômica Si/Al.

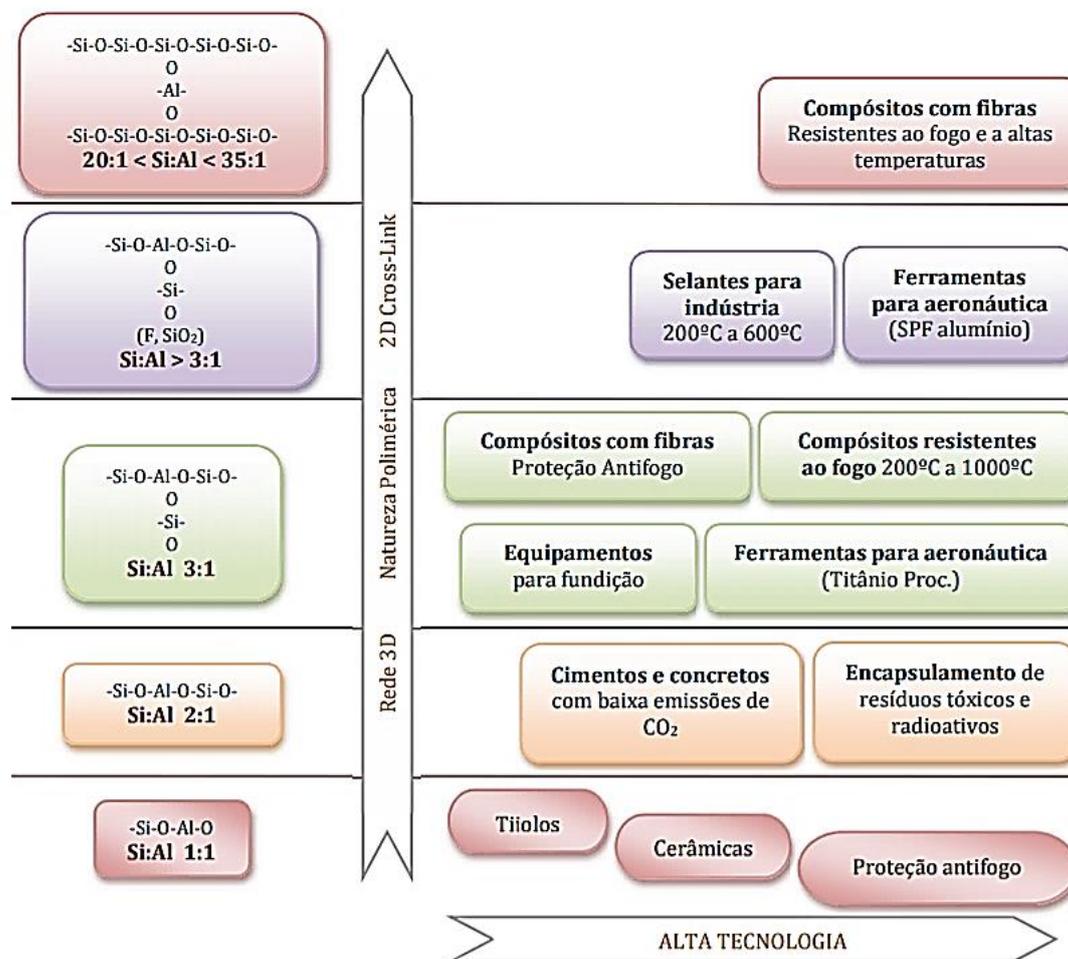


Figura 3.10 – Aplicações dos geopolímeros a partir da razão molar [45].

Para este estudo o processo de preparação do ligante geopolimérico baseou-se na razão atômica de Si/Al igual a 2, visto que esta razão atende a aplicação proposta no projeto, neste caso a produção de concretos com baixa emissão de CO₂ na aplicação de pavimentos intertravados.

3.4.6 Mercado para geopolímeros

Os geopolímeros apresentam grande versatilidade em diversos tipos de aplicações, apresentando como potenciais aplicações em pedras decorativas, materiais com finalidade de isolamento térmica, argamassas, materiais refratários (para moderadas temperaturas, ~1000°C), sistemas de resina de alta tecnologia, telhas cerâmicas, materiais para recuperação e reforços de infraestruturas,

materiais com alta tecnologia para utilização em interiores de automóveis e aeronaves, entre outras. [83].

Por outro lado, o consumo de concreto produzido a base de cimento Portland aumentou gradativamente nos últimos anos e, atualmente, é o segundo material mais consumido no mundo, visto que a água é o elemento mais consumido. Estima-se que a produção de cimento seja de três bilhões de toneladas ao ano, gerando quantidade significativa de dióxido de carbono, uma vez que é liberado 1 kg de CO₂ no meio ambiente para cada 1 kg de cimento Portland produzido. Estudos apontam que a produção do cimento Portland emite de 5 a 8% dos gases que provocam o efeito estufa gerados por atividades antropogênicas [84, 85].

Dessa forma, os materiais geopoliméricos demonstram ser boa alternativa ao consumo de cimento Portland, já que, eles apresentam características cimentícias similares ou até melhores, tornando-o promissor para fabricação de argamassas e concretos geopoliméricos [33]. Do ponto de vista ambiental, os concretos geopoliméricos demonstram ser atrativos, pois sua produção emite menos quantidade de CO₂ quando comparado ao cimento Portland, além de que a produção destes demanda de menor quantidade de energia [4, 55].

As Figuras 3.11 e 3.12 referem-se ao consumo de energia necessário para produção de 1 m³ de concreto contendo cimento Portland e concreto geopolimérico, respectivamente. Comparando os valores de energia consumidos, tem-se que o maior consumo para fabricação de concreto tradicional é referente à produção do cimento Portland, em aproximadamente 1.550 Mega Joule, que equivale a 86% de energia consumida em todo o processo da produção deste produto. Na produção do concreto geopolimérico, o maior consumo de energia é devido as etapas de fusão e dissolução para produção de silicato de sódio, consumindo 616 MJ, valor este que equivale a aproximadamente 63,5% de toda energia necessária para produção do geopolímero [86, 87].

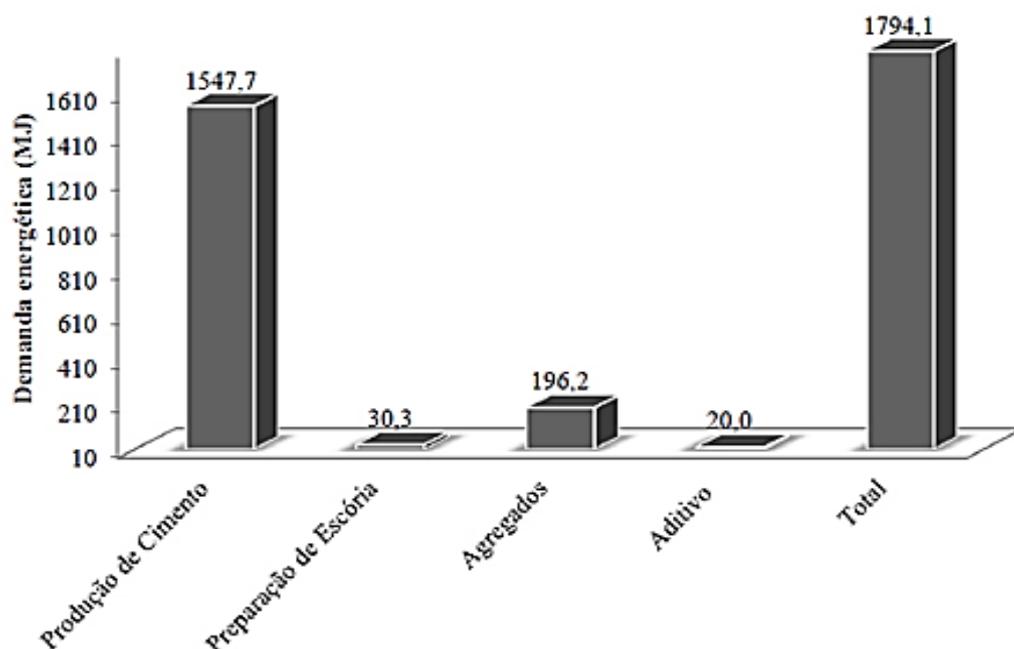


Figura 3.11 – Consumo de energia na produção do concreto Portland [87].

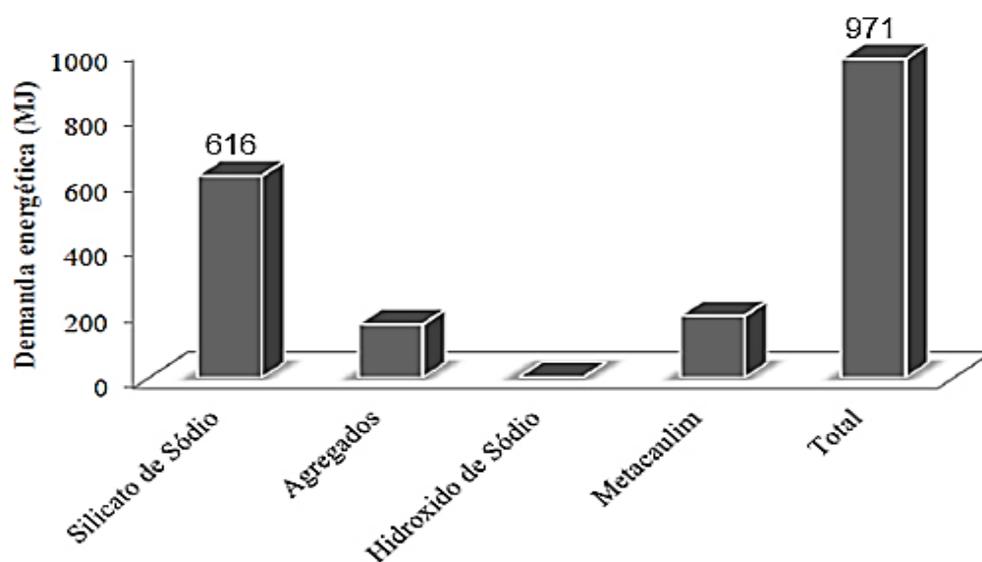


Figura 3.12 – Consumo de energia na produção do concreto geopolimérico [87].

Propriedades presentes nos geopolímeros como elevada resistência à compressão e à flexão, resistência à moderadas temperaturas e resistência ao ataque químico fazem com que os benefícios da utilização de cimento geopolimérico como meio alternativo ao cimento Portland não se restrinja

apenas a questões ambientais. Além disso, o menor custo, forte adesão à superfícies metálicas e não metálicas, estabilidade dimensional, baixa permeabilidade a fluidos e possibilidade da adição de resíduos industriais na sua cadeia de produção são aspectos benéficos para utilização no setor da construção civil [39].

A aplicação do cimento geopolimérico resulta em ganho de resistência logo nas horas iniciais. A etapa de cura ocorre rapidamente em temperatura ambiente, onde 4 horas de cura resulta em resistência a compressão entre 20% e 30% referente a resistência final da composição aplicada. Após o termino do processo de cura, a resistência à compressão equivale entre 70 a 100 MPa. Por outro lado, o calor pode acelerar a pega e o endurecimento do cimento geopolimérico, sendo que 4 horas de cura à temperatura de 65°C a resistência a compressão chega à aproximadamente 41 MPa [33, 88].

Análises comparativas de algumas propriedades do cimento Portland e do geopolimérico podem ser observadas na Figura 3.13.

Na Figura 3.13 o gráfico A mostra variação da resistência à compressão em MPa ao longo do processo de cura expresso em dias, e pode-se observar a superioridade do cimento geopolimérico ao longo de todo o período de cura analisado. O gráfico B mostra a resistência à corrosão, nota-se que o cimento geopolimérico não demonstra alterações relevantes em seu peso, já que não faz o uso de pedra calcária como matéria-prima, tornando um material interessante em ambientes marinhos. O gráfico C mostra a resistência à compressão em função da temperatura e pode-se verificar que a resistência à altas temperaturas do cimento geopolimérico é extremamente superior à resistência dos demais tipos de cimento Portland. Para todos os tipos de cimento Portland avaliados pode-se observar que eles perdem bruscamente a resistência à compressão a 400°C, e a essa mesma temperatura quase não ocorre alteração na resistência para o cimento geopolimérico [89].

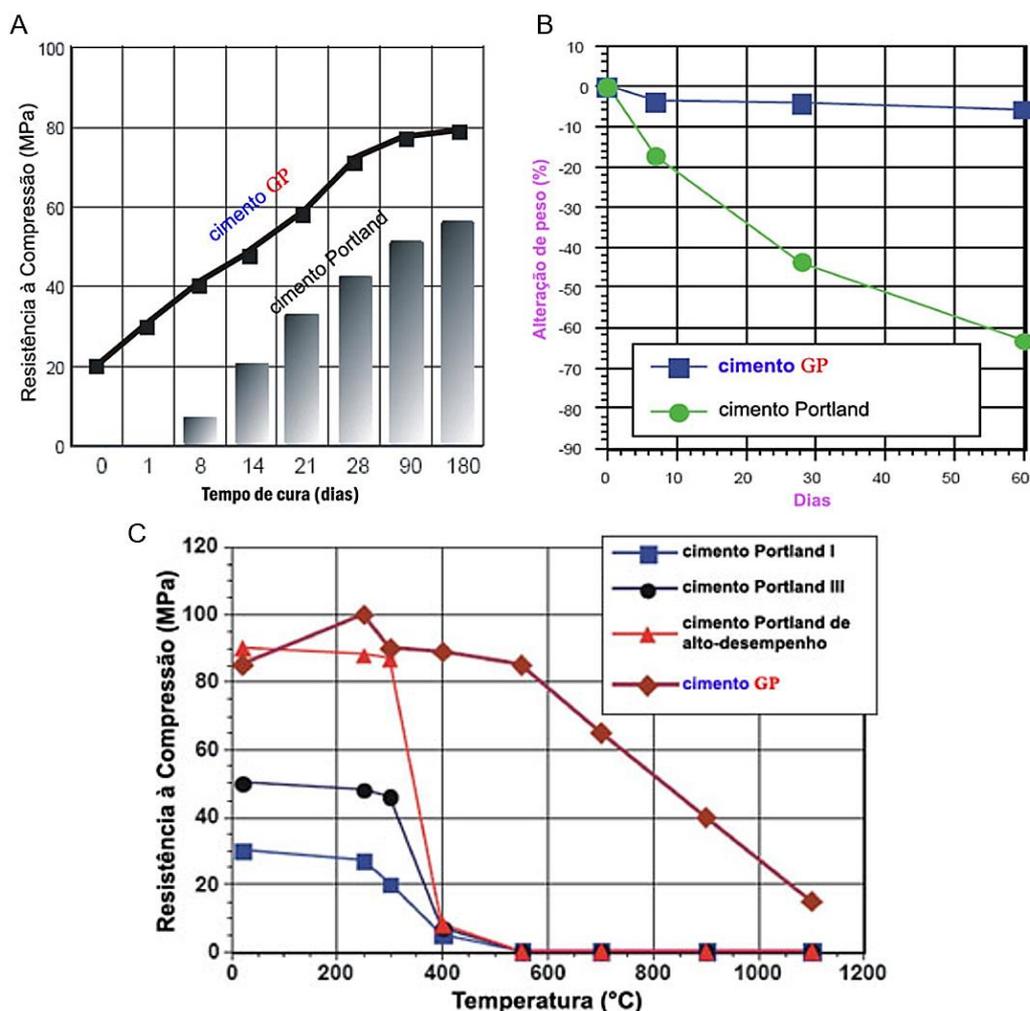


Figura 3.13 - Comparativo entre algumas propriedades do cimento geopolimérico e cimento Portland [89].

Mesmo o cimento geopolimérico apresentando diversas características benéficas, ele ainda não é frequentemente utilizado pelo setor construtivo. A produção do cimento geopolimérico tem a possibilidade de utilizar diversos tipos de matérias-primas (como fonte de Al_2O_3 e SiO_2 ou como ativadores), já que é um processo de ativação alcalina de aluminossilicatos, porém, os centros de pesquisas e empresas fabricantes desse material fazem o uso de matérias-primas locais, tornando a troca de informação limitada. A inexistência de normas técnicas também é um fator limitante da utilização do material, estas contribuiriam para a aplicação correta e para se obter a resistência mecânica desejada, além da segurança dos operários [87]. Em contrapartida, o cimento

Portland, que utiliza calcário e argila, disponíveis mundialmente, já possui uma normalização estabelecida.

Mesmo sem ainda uma normalização vigente, o material geopolimérico é bastante promissor em aplicações que exige liberação rápida para o uso, como vias de tráfego intenso, pistas de aeroportos, entre outras aplicações [33].

Exemplo de aplicação do concreto geopolimérico pode ser visto na Figura 3.14. Nessa obra, foram utilizados aproximadamente 30.000 metros cúbicos de concreto geopolimérico para a construção do aeroporto de Brisbane West Wellcamp (Austrália), reduzindo em 6.600 toneladas de emissões de carbono. Essa construção é detentora da maior obra já feita utilizando concreto geopolimérico [90].



Figura 3.14 – Aeroporto de Brisbane West Wellcamp (Australia) construído com concreto geopolimérico [90].

Um estudo realizado por Vaz et al. [91], comparou a aplicação de concreto geopolimérico e concreto de cimento Portland em pavimentos intertravados, utilizando a proporção de ligante, agregado fino e agregado graúdo de 1: 1,2: 2,2. Para o preparo do concreto de cimento Portland, utilizou-se a relação água/cimento de 0,35. O concreto geopolimérico foi preparado com a substituição da quantidade de cimento Portland por cinza volante, mantendo a mesma proporção de agregados. A solução ativadora foi obtida através do hidróxido de sódio em concentrações de 8M, 10M e 12M junto com silicato de

sódio, caracterizando três composições de concreto geopolimérico e uma de concreto de cimento Portland. A análise da resistência à compressão foi realizada em 1, 3, 7 e 28 dias, idades nas quais todas as amostras preparadas a partir do geopolímero tiveram resultados superiores aos das amostras a partir de cimento Portland, que obteve resistência à compressão média de 49 MPa. Verificou-se também a importância da concentração do ativador alcalino no ganho de resistência à compressão e a influência na densidade das amostras, sendo que o aumento das concentrações resultou em maiores resistências à compressão e densidades. Em relação à absorção de água, ambas as amostras preparadas a partir de geopolímero e cimento Portland, obtiveram absorção inferior a 7%, o que as torna apta ao uso, sendo ainda que os resultados das amostras geopoliméricas foram inferiores aos resultados obtidos para as amostras a partir do cimento Portland.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Procedimento Experimental

O plano de trabalho deste projeto de dissertação abordou como principal objetivo a utilização de materiais alternativos e mais ecológicos na fabricação de peças de concreto para pavimentos intertravados, especificamente a substituição do ligante cimentício convencional (Portland) por ligante geopolimérico preparado a partir do metacaulim comercial.

Além da substituição do ligante cimentício, este trabalho também procurou reutilizar resíduos gerados no setor da construção civil, particularmente resíduos de cerâmicas vermelhas, como agregado graúdo para o preparo de concreto de cimento Portland aplicado na fabricação de pavimentos intertravados. Para verificação da viabilidade do concreto, utilizou-se a norma ABNT NBR 9781:2013 que estabelece os parâmetros mínimos para utilização dessas peças fabricadas para esse tipo de aplicação. E, quanto aos concretos geopoliméricos, devido a inexistência de normas técnicas, utilizou-se os mesmos parâmetros abordados nas normas destinadas ao concreto de cimento Portland.

Na Figura 4.1 está disposto um fluxograma com as principais etapas necessárias para a concretização do desenvolvimento do projeto experimental.

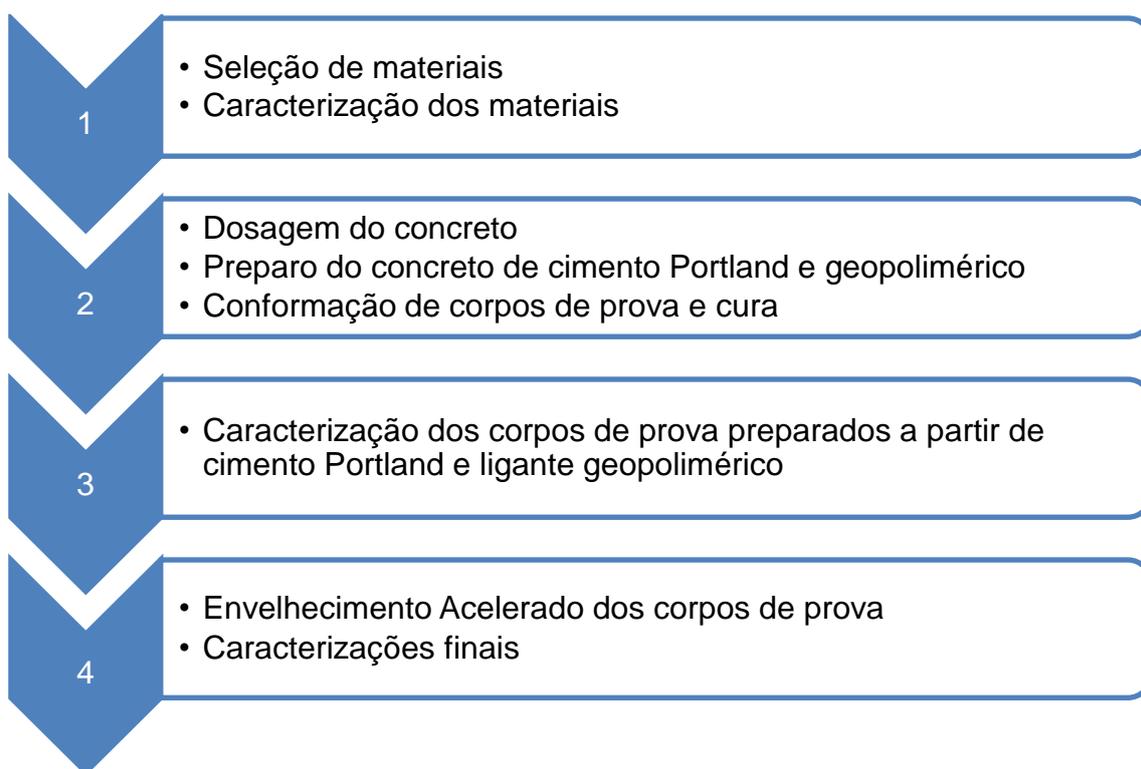


Figura 4.1 – Fluxograma representativo das principais etapas do plano experimental [autoria própria]

A primeira etapa é dividida em duas fases: seleção e caracterização dos materiais em estudo. A fase de seleção abordou os materiais utilizados para o preparo do concreto a partir de cimento Portland e geopolimérico, tais como o cimento Portland, os materiais necessários para o preparo do ligante geopolimérico, os agregados e os materiais utilizados como adições ao ligante cimentício. Na fase de caracterização procurou-se relacionar e adequar os materiais, seguindo as condições e critérios estabelecidas por norma, para a preparação de concretos que são aplicados em pavimentos intertravados.

A segunda etapa abordou a elaboração do traço e obtenção dos corpos de prova. Pela ausência de um traço normativo para produção de concreto geopolimérico com utilização de RCC para pavimentos intertravados, neste caso, o mesmo traço de concreto preparado com cimento Portland foi reproduzido para o geopolimérico. Em relação à obtenção dos corpos de prova, esta etapa consistiu no preparo dos concretos (cimento Portland e geopolimérico) e a moldagem dos corpos de prova pelo método de vertimento e vibração em moldes, posteriormente, realizou-se o processo de cura, simulando

o processo de peças dormidas utilizado na fabricação de pavimentos intertravados.

A terceira etapa abordou a caracterização dos corpos de prova após o processo de cura por meio de análises das propriedades físicas e mecânicas. Posteriormente, os resultados foram analisados e discutidos sobre a viabilidade na aplicação destes concretos em pavimentos intertravados.

Após identificar as composições de concreto mais promissoras para aplicação em pavimentos intertravados, realizou-se na quarta etapa o ensaio de envelhecimento acelerado das amostras selecionadas, analisando-se após novas caracterizações das propriedades físicas e mecânicas das amostras envelhecidas, a viabilidade das composições para este tipo de aplicação.

4.2 Materiais

Para o desenvolvimento do concreto geopolimérico e o concreto a partir do cimento Portland foram utilizados os seguintes materiais:

- **Metacaulim:** Material comercializado pela empresa Metacaulim do Brasil que foi utilizado como fonte de Si/Al (precursor) no preparo do ligante geopolimérico.

- **Cimento Portland CP – V:** Ligante utilizado para produção de concreto a base de cimento Portland, aqui tido como concreto de referência. Optou-se em utilizar este tipo de CP devido à elevada resistência em idades iniciais de cura e possibilidade de desforma rápida das peças moldadas.

- **Hidróxido de sódio:** Insumo da marca Êxodo Científica, comercializado no tipo em escamas que foi utilizado no preparo da solução ativadora alcalina. A especificação do material está apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Especificações do hidróxido de sódio [autoria própria]

Aspecto	Escamas Brancas
Teor (Concentração)	Min: 97,5%
Carbonato de sódio	Max: 0,6%
Cloreto de sódio	Max: 0,03%
Ferro (Fe)	Max: 6 ppm

Fonte: [autoria própria]

- Dióxido de silício: comercializado como sílica coloidal, material amorfo fonte de Silício. Devido ao fato da relação Si/Al proveniente do metacaulim ser inferior a relação 2:1, optou-se por utilizar a sílica coloidal como fonte de Si para suprir a quantidade de Si necessária.

- Areia fina/média natural: Material utilizado como agregado miúdo para produção de concreto, com granulometria entre 0,075 mm a 1,2 mm conforme estabelecido pela ABNT NBR 7211:2009

- Brita 0 (basalto): Material utilizado como agregado graúdo convencional para produção de concreto, caracterizado com dimensões entre 4,8 mm a 9,5 mm e densidade de 2,9 g/cm³.

- Resíduos da construção civil - RCC: Material utilizado como substituto ao agregado graúdo convencional (basalto) na produção de concretos, respeitando a mesma granulometria. O RCC foi coletado em uma usina de reciclagem ECO PONTO, localizada no município de São Carlos-SP.

- Aditivo superplastificante: Aditivo orgânico a base de policarboxilatos que proporciona elevada trabalhabilidade, ganho de resistência mecânica e redução de água no concreto. O aditivo utilizado foi o Silicon Premix 40205 da marca Tecnosil.

4.2.1 Adequação dos componentes para concretos geopoliméricos

Essa etapa teve como objetivo caracterizar e adaptar os materiais utilizados no preparo dos concretos geopoliméricos, matéria-prima precursora e agregado.

4.2.1.1 Metacaulim

1) Análise química elementar

Para melhor entendimento sobre a influência do precursor geopolimérico metacaulim na geopolimerização e sua adequação ao uso em concretos, foi realizada a caracterização da composição química elementar por meio da técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX)

A caracterização por espectrometria de fluorescência de raios X foi realizada no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) localizado na

Universidade Federal de São Carlos utilizando o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu.

4.2.1.2 Agregado

O agregado graúdo convencional (brita) e o RCC foram previamente selecionados para apresentarem uma similar distribuição granulométrica. Como RCC foram utilizados os resíduos gerados a partir de cerâmicas vermelhas, telhas e tijolos de alvenaria, que são classificados de acordo com a Resolução n° 307 do CONAMA como resíduo classe A. A Figura 4.2 apresenta imagem de amostras de cerâmica vermelha utilizadas como agregado graúdo antes da britagem.



Figura 4.2 – Resíduo de construção civil proveniente de cerâmica vermelha [autoria própria].

Para facilitar o ajuste granulométrico do RCC grosseiro, este foi triturado em um britador de mandíbula, reduzindo o RCC em escalas menores. O equipamento utilizado para triturar está ilustrado na Figura 4.3.

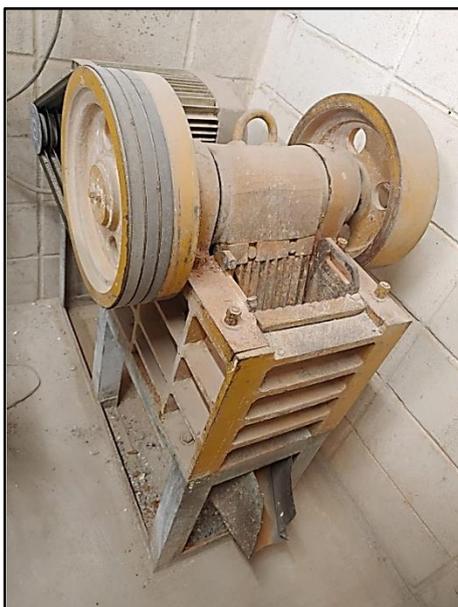


Figura 4.3 – Britador de mandíbula [autoria própria].

l) Separação granulométrica

Ambos os tipos de agregados graúdo (brita e RCC) e miúdo foram caracterizados de acordo com as ABNT NBR NM 248:2003 e ABNT NBR 7211:2009, atendendo as faixas granulométricas, de 4,8 mm a 9,5 mm para agregado graúdo e 0,075 mm a 1,2 mm para agregado miúdo. Para a realização do ensaio de granulometria, inicialmente ambos os agregados foram aquecidos em uma estufa à temperatura de 105°C durante 24 horas para eliminar a umidade do material.

O ensaio de granulometria dos agregados foi realizado através de um conjunto de peneiras metálicas e um agitador mecânico, conforme a Figura 4.4. Para este ensaio o agregado graúdo e miúdo foram inseridos sob o conjunto de peneiras e agitados mecanicamente por 10 minutos, o que resultou na separação dos diferentes tamanhos de grãos constituídos nas amostras.



Figura 4.4 – Conjunto de peneiras metálicas e agitador mecânico [autoria própria].

Após o processo de separação granulométrica, somente os agregados graúdos (brita e RCC) foram submetidos a caracterização da absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente.

II) Absorção de água (%), Porosidade aparente (%) e Densidade aparente (g/cm^3)

Para determinar a absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente dos agregados graúdos, utilizou-se o método de imersão em água baseado no Princípio de Arquimedes. Os agregados foram aquecidos em temperatura de 110°C durante 24 horas para a obtenção da massa seca; posteriormente foram submersos em água por 24 horas e medidas a massa imersa e a massa úmida. Para a coleta da massa úmida, enxugou-se a superfície dos agregados para retirar o excesso de água.

Após a coleta dos dados aplicou-se as Equações 4.1, 4.2 e 4.3 para a determinação da absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente.

$$AA (\%) = \frac{mu-ms}{ms} \times 100 \quad (4.1)$$

Onde:

AA é a absorção de água do corpo de prova, expressa em porcentagem (%);

Ms é a massa do corpo de prova seco, em gramas (g);

Mu é a massa do corpo de prova saturado, em gramas (g).

$$PA (\%) = \frac{mu-ms}{mu-mi} \times 100 \quad (4.2)$$

Onde:

PA é a porosidade aparente, expressa em porcentagem (%);

Mi é a massa imersa do corpo de prova em água

$$DA = \frac{ms}{mu-mi} \times \rho \quad (4.3)$$

Onde:

DA é a densidade aparente (g/cm³)

P é a densidade da água (g/cm³)

Vale ressaltar que não só para a caracterização dos agregados, mas também para o uso dos agregados nos concretos, o ensaio de quarteamento foi realizado, visto que este ensaio tem como objetivo separar porções homogêneas representativas dos materiais.

4.3 Dosagem do concreto

Para a produção dos concretos visando aplicação em pavimentos intertravados, adotou-se o traço em massa 1:1,2:2 (cimento, agregado miúdo e agregado graúdo) com relação água/cimento de 0,35, sugerido por Vaz et al [91].

Este traço foi escolhido devido ao valor de resistência à compressão relatado no estudo ser satisfatório para aplicação em pavimentos intertravados, que neste caso utilizou cimento Portland e agregados convencionais por meio do método de conformação de peças prensadas. Devido a consistência seca do concreto para o método de conformação utilizado pelo autor, foi necessário adaptar o traço para o atual trabalho adicionando 1% em massa de aditivo plastificante, o que tornou possível a produção de concreto com consistência plástica e posteriormente a conformação dos corpos de prova pelo método de peças dormidas.

4.3.1 Preparação do concreto de cimento Portland com agregado convencional e agregado RCC

Para a mistura do concreto de referência (cimento Portland), ilustrado na Figura 4.5, foi utilizado um misturador planetário da marca Amadio em rotação baixa. Inicialmente foi misturado por 2 minutos na batedeira o cimento Portland com a areia média, posteriormente foi adicionado a brita 0 e homogeneizado por mais 2 minutos. A adição de água foi feita gradativamente conforme o misturador homogeneizava o concreto. Ao término da adição de toda a água, foi adicionado o aditivo plastificante e misturado por mais 4 minutos.

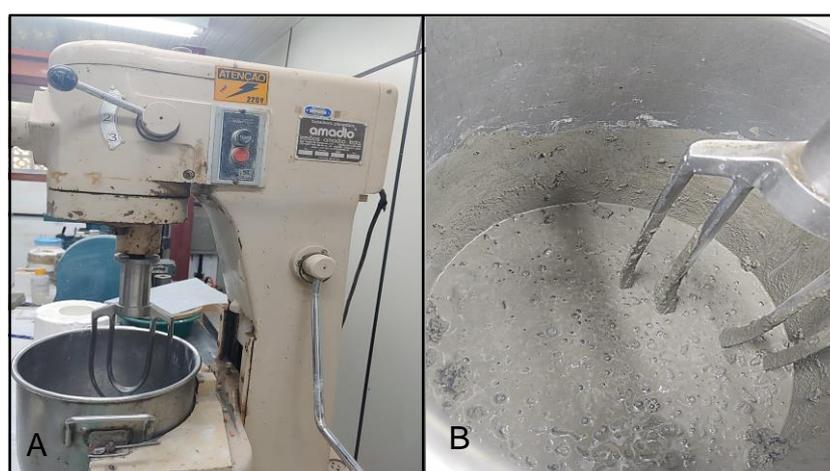


Figura 4.5 –Mistura do concreto de referência: (a) misturador planetário; (b) concreto de cimento Portland e brita [autoria própria].

Referente ao traço do concreto de cimento Portland com RCC como agregado graúdo, foram produzidos concretos de duas formas diferentes: a primeira, baseou-se no processo descrito anteriormente para o agregado graúdo convencional (brita), porém agora com o agregado do RCC com a mesma relação água/cimento de 0,35, visando uma análise comparativa. Na segunda forma de produção dos concretos de cimento Portland com RCC, os agregados foram previamente umedecidos com um teor de água equivalente ao valor de absorção de água, obtido na caracterização desses agregados e assim os agregados de RCC foram umidificados antes do uso. Leite [27] relatou que o RCC pode influenciar diretamente na água necessária para hidratação do cimento, já que apresenta maior absorção de água quando comparado aos agregados naturais. As imagens apresentadas na Figura 4.6 ilustram os aspectos obtidos para as duas situações, isto é, concreto com agregados RCC secos conforme preparados (britados e separados granulometricamente para satisfazer as dimensões usuais em revestimentos intertravados) e agregados RCC previamente umedecidos, contemplando o valor de absorção de água previamente determinado na caracterização dos agregados. Pode-se notar que para o mesmo teor de água, os agregados RCC sem umidificação, absorveram grande quantidade de água, certamente modificando a relação água/cimento de 0,35 estabelecida para o traço, gerando uma mistura mais seca, enquanto o concreto com agregados RCC umedecidos aparentam características próprias para vertimento e moldagem.

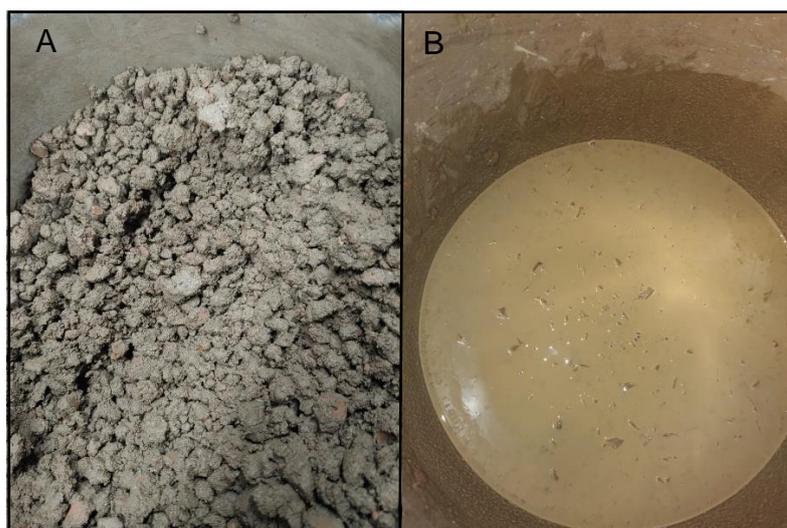


Figura 4.6 – Concreto de cimento Portland e RCC: (a) RCC seco; (b) RCC úmido [autoria própria].

Conforme a Figura 4.6 pode-se notar que o concreto preparado a partir do RCC úmido possui aparência de melhor fluidez. Isso ocorre devido a maior presença de água disponível, não mais absorvida pelos agregados, mas que mantém a mesma relação água/cimento do concreto referência (cimento Portland com brita), resultando melhores condições de moldagem de corpos de prova, sem falhas de preenchimento.

4.3.1.1 Conformação e cura dos corpos de prova

Após o preparo dos concretos foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 7 cm de altura por 6 cm de diâmetro por vertimento com vibração durante 3 minutos para retirada das bolhas de ar e melhorar o adensamento do concreto. Para o processo de vibração dos corpos de prova foi utilizado uma mesa vibratória da marca Donar, conforme mostrado na Figura 4.7 e os corpos de prova foram vibrados em potência média de vibração.



Figura 4.7 – Mesa vibratória [autoria própria].

Foram moldados corpos de provas para atender aos tempos de caracterizações de 7, 14 e 28 dias de cura, sendo que após 1 dia de cura os corpos de prova foram desmoldados (conforme estabelecido pelo método de peças dormidas) e armazenados dentro de uma câmara úmida em temperatura ambiente até o tempo estabelecido para a caracterização. A Figura 4.8 apresenta imagens corpos de prova desmoldados e prontos para o processo de cura.

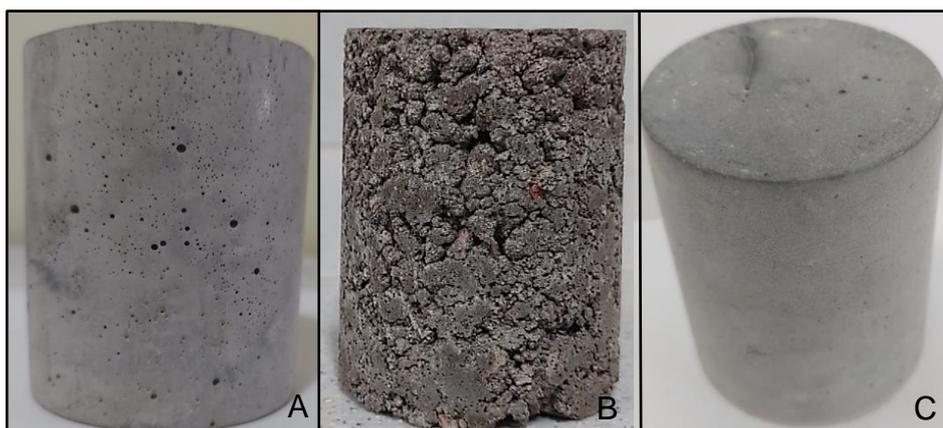


Figura 4.8 – Corpos de prova moldados: (a) Cimento Portland e brita 0; (b) Cimento Portland e RCC seco; (c) Cimento Portland e RCC úmido [autoria própria].

Pode-se observar pelas imagens da Figura 4.8 que os corpos de prova das diferentes composições de cimento Portland e agregados, após a desmoldagem apresentaram como fator diferencial o aspecto físico, principalmente a composição que utilizou como agregado graúdo o RCC seco.

4.3.2 Síntese do geopolímero

4.3.2.1 Solução ativadora alcalina

Para o preparo do geopolímero foi utilizada solução ativadora a partir do hidróxido de sódio. Pelo fato de ser uma reação exotérmica, a solução foi preparada com 24 horas de antecedência da síntese do geopolímero, que proporcionou tempo suficiente para o seu resfriamento. A Figura 4.9 ilustra o procedimento realizado no preparo da solução ativadora.

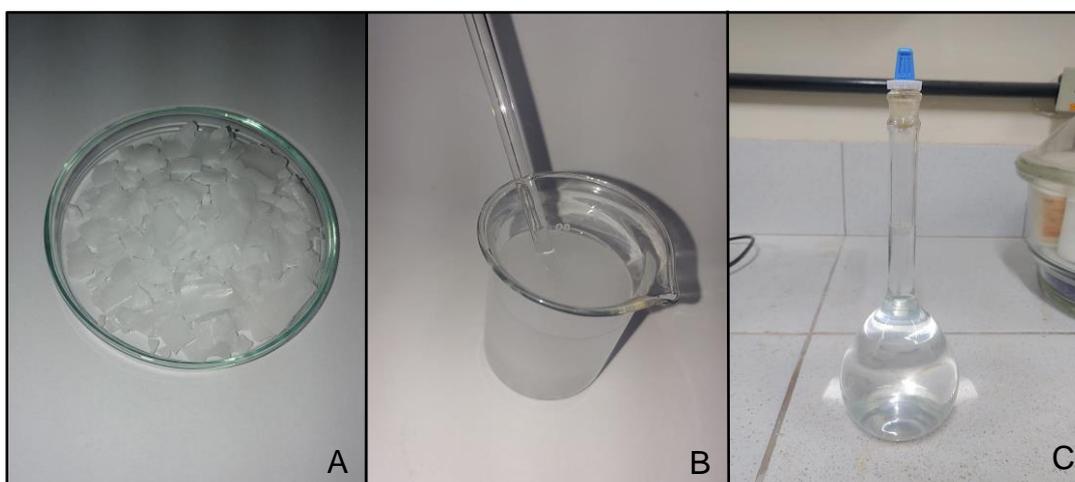


Figura 4.9 – Preparo da solução ativadora de NaOH: (a) NaOH em escamas; (b) Mistura do NaOH em água; (c) Solução ativadora de NaOH pronta no balão volumétrico com concentração de 12 mols/l [autoria própria].

O preparo da solução foi feito inicialmente em um béquer contendo água destilada e 480g de hidróxido de sódio em escamas. A solução do béquer foi misturada até formar solução transparente e posteriormente inserida em um balão volumétrico, onde foi adicionado água destilada até a marca de 1 litro, que

resultou em solução de NaOH com concentração de 12 mols/l. O pH da solução foi conferido através de papel indicador, que apontou pH acima de 14.

4.3.2.2 Preparo do ligante geopolimérico

O preparo do geopolímero baseou-se na razão atômica Si/Al igual a 2, tal proporção indicada por Davidovists [45] para concretos com baixa emissão de CO₂. A relação em massa de ativador/precursor manteve-se em 0,35, simulando a mesma proporção água/cimento para o concreto de cimento Portland.

A adição de sílica coloidal foi necessária para satisfazer a relação atômica, já que a razão Si/Al presente no metacaulim segundo John e Nita [59] é inferior e não há contribuição de silício por parte da solução ativadora empregada.

No processo de síntese do geopolímero a solução ativadora de hidróxido de sódio foi misturada com a sílica coloidal e posteriormente adicionado ao metacaulim. Com o auxílio de um misturador planetário, misturou-se os componentes por 3 minutos, interrompendo a mistura para retirada do acúmulo de materiais nas bordas e na pá agitadora e posteriormente homogeneização por mais 3 minutos. Devido à área superficial do metacaulim (partículas finas) e à relação ativador/precursor (líquido/pó), que resultou em excesso de partículas a serem misturadas, houve a necessidade da adição de água para garantir a total mistura dos componentes. O teor de água incorporado foi baseado na mesma relação água/cimento utilizada para os concretos de cimento Portland, e essa adição foi de forma gradativa até uniformizar todo ligante geopolimérico. A Figura 4.10 apresenta a imagem do ligante geopolimérico preparado.



Figura 4.10 – Ligante geopolimérico [autoria própria].

Após o preparo do ligante geopolimérico, manteve-se o ligante dentro do misturador e foi adicionado o agregado graúdo e miúdo para produção do concreto geopolimérico.

4.3.2.3 Produção do concreto geopolimérico a partir do agregado convencional e do RCC

Para a produção do concreto geopolimérico adotou-se a mesma dosagem utilizada no concreto de cimento Portland, o que proporcionou comparações mais precisas dos resultados obtidos dos corpos de prova que foram posteriormente moldados. Foi utilizado o traço em massa de 1: 1,2: 2 (ligante geopolimérico, agregado miúdo e agregado graúdo) com adição de 1% em massa de aditivo plastificante. Durante a mistura do ligante com os agregados houve a necessidade de um ajuste de umidade para proporcionar características aparente de melhor trabalhabilidade ao concreto geopolimérico. A Figura 4.11 apresenta a imagem da mistura entre o ligante e os agregados no interior do misturador.



Figura 4.11 – Mistura do concreto geopolimérico [autoria própria].

O procedimento de mistura basicamente foi o mesmo da preparação dos concretos de cimento Portland: inicialmente o ligante geopolimérico no misturador, seguido da adição do agregado miúdo (areia) e por fim o agregado graúdo, alternadamente com adição de água.

4.3.2.4 Conformação e cura dos corpos de prova

As dimensões, quantidades e procedimento de conformação dos corpos de provas moldados com o concreto geopolimérico foram as mesmas realizadas para os preparados com cimento Portland, contudo, os corpos de prova foram desmoldados no dia posterior e envolvidos em plástico filme para evitar a formação de carbonatos por parte do NaOH (proveniente da solução ativadora), e, conseqüentemente, a perda de resistência mecânica. A Figura 4.12 apresenta imagens dos corpos de prova desmoldados de concreto geopolimérico.

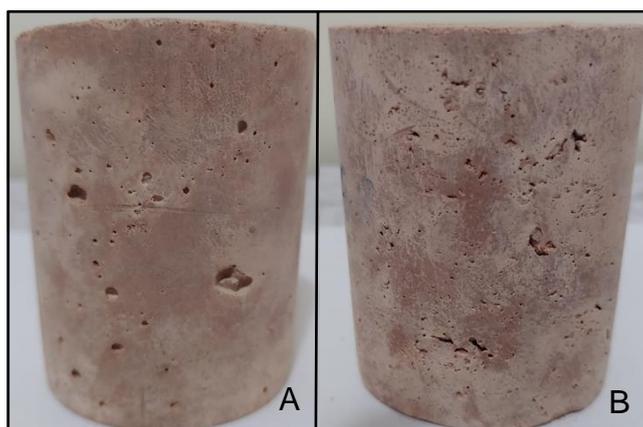


Figura 4.12 – Corpos de prova de concreto geopoliméricos: (a) geopolímero e brita 0; (b) geopolímero e RCC [autoria própria].

Após a vedação dos corpos de prova com plástico filme, eles foram submetidos ao processo de cura em local coberto e em temperatura ambiente, durante 7, 14 e 28 dias de cura para posteriormente serem caracterizados.

4.4 Caracterização dos corpos de prova

Após a conclusão da etapa de conformação e cura dos corpos de prova de ambos os tipos de concretos, foram realizados ensaios para verificar o potencial das composições na aplicação de pavimentos intertravados, sendo realizados os ensaios de absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente, porosimetria por intrusão de mercúrio, resistência à compressão axial; análise microestrutural e envelhecimento acelerado dos corpos de prova.

Os resultados obtidos nas caracterizações de resistência à compressão e absorção de água foram comparados com os resultados estabelecidos pela ABNT NBR 9781:2013 que define resistência à compressão igual ou superior a 35 MPa e absorção de água igual ou inferior a 6%.

I) Absorção de água (%), Porosidade aparente (%) e Densidade Aparente (g/cm^3)

Este ensaio foi realizado conforme o mesmo procedimento utilizado na caracterização dos agregados (descrito no item 4.2.2.2). Neste caso, foram utilizados os corpos de prova após 28 dias do processo de cura.

II) Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova foram realizados para os respectivos tempos de cura de 7, 14 e 28 dias, de acordo com a Equação 4.4, estabelecida pela ABNT NBR 5739:2018 [92]. Para a realização do ensaio foi utilizado a máquina de ensaio universal da EMIC com capacidade de carga máximo de 600 kN.

$$F_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (4.4)$$

Onde:

F_c é a resistência à compressão, expressa em mega pascal (MPa);

F é a força máxima alcançada, expressa em newtons (N);

D é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm)

Nota: Para relação h/d menor que 1,94, multiplicar a força F pelo fator de correção correspondente a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Fator de correção

Relação h/d	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,86

Fonte: [92].

III) Distribuição do tamanho dos poros

Neste ensaio foi utilizado o porosímetro da marca American Instrument Co, modelo 5-7118 com faixa de 0 a 5000 Psi, conforme imagem apresentada na Figura 4.13, visando analisar a distribuição do tamanho dos poros contidos nos corpos de prova (matriz) através da intrusão de mercúrio (Hg).

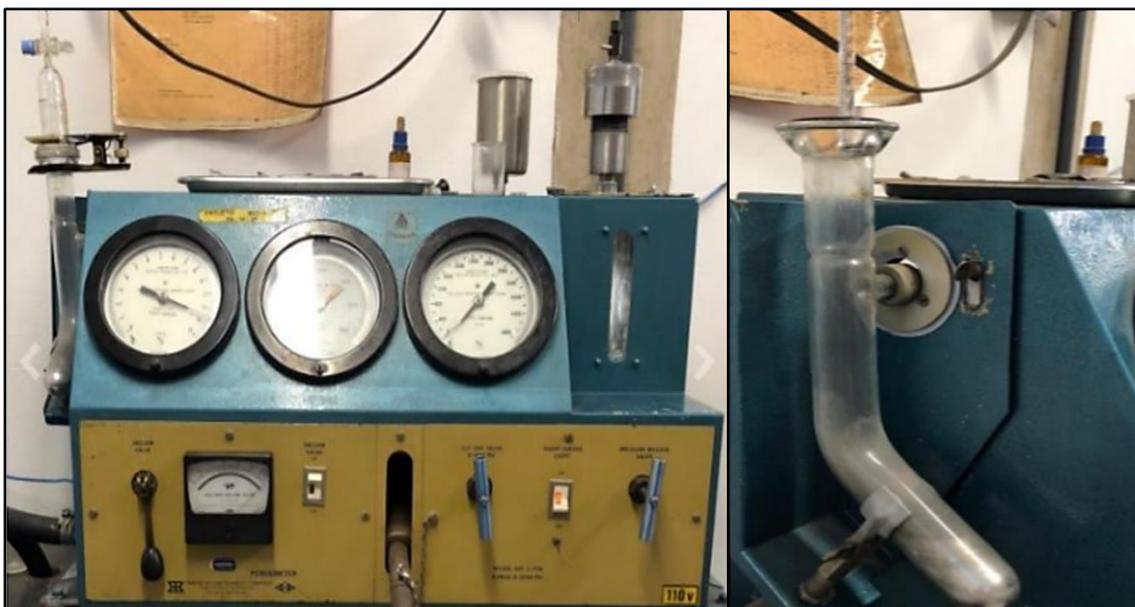


Figura 4.13 – Porosímetro de Mercúrio [autoria própria].

IV) Microscopia

Essa caracterização foi realizada com o objetivo de se observar a microestrutura dos corpos de prova e verificar a adesão e os vazios provenientes da mistura entre o ligante cimentício (Portland ou geopolimérico) e os agregados (convencional ou RCC). Para esta análise foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo FEI INSPECT S50 ilustrado na Figura 4.14; imagem fornecida pelo Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) / UFSCar.



Figura 4.14 – Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado durante as análises microestruturais [93].

4.5 Envelhecimento Acelerado

Este ensaio teve como propósito analisar a ocorrência de danos durante o tempo de uso das composições que melhor apresentaram características para aplicação em pavimento intertravado, avaliando o quanto afetaram a durabilidade e a resistência mecânica dessas composições. A Figura 4.15 apresenta imagens que simbolizam o procedimento utilizado para este ensaio.



Figura 4.15 – Procedimento para o ensaio de envelhecimento acelerado: (a) imersão em água; (b) secagem em estufa [autoria própria].

Para esta análise foi utilizado o método de ciclos de imersão em água e secagem sequenciais, que consiste na imersão de corpos de prova em água deionizada durante 18 horas e posterior secagem por 6 horas em estufa com temperatura de 100°C conforme a Figura 4.15. O ensaio consistiu em 50 ciclos de imersão e secagem, que equivale a simulação de aproximadamente 1 ano de uso dos corpos de prova.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise química do Metacaulim comercial

O resultado obtido por fluorescência de raios X (FRX) referente a composição química elementar do metacaulim comercial está representado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Composição química do metacaulim comercial.

Metacaulim Comercial	
Elementos	% em massa
Si	45,94
Al	35,64
K	7,80
Fe	6,34
Ti	3,11
Mg	0,71
Zr	0,12
Rb	0,04
Cr	0,04
Cu	0,02
Ga	0,02
Zn	0,02
Outros	0,2

Fonte: [autoria própria].

Nota-se que os principais elementos químicos presentes na amostra são o silício e alumínio, em proporções semelhantes ao mencionado por John e Nita [59]. De acordo com Davidovits [43, 45] a razão atômica Si/Al ideal para cimentos e concretos geopoliméricos é igual a 2, visto que este fator determina a formação da estrutura tridimensional dos polissialatos, o que reflete nas propriedades e consequentemente nas aplicações. Portanto, a razão atômica presente pelo metacaulim comercial é insuficiente, uma vez que essa razão é de aproximadamente 1;29, assim, tornou-se necessário a utilização de sílica coloidal para complementar o restante de silício necessário para satisfazer a relação atômica.

5.2 Agregados

Conforme descrito (item 4.1.1.2), ambos os tipos de agregados graúdo e miúdo foram submetidos ao ensaio granulométrico para adequação das faixas granulométricas propostas no trabalho. Assim, os ensaios foram realizados conforme especificado pela ABNT NBR NM 248:2003 e ABNT NBR 7211:2009.

5.2.1 Granulometria do agregado miúdo

A Tabela 5.2 apresenta o resultado da distribuição granulométrica da areia após separação da fração grossa e fina e a Figura 5.1 ilustra a respectiva curva granulométrica obtida a partir deste resultado de granulometria. Vale ressaltar que, apenas essa faixa de areia com dimensões entre 0,2 mm a 0,6mm (que se enquadra como areia fina/média) foram utilizadas na preparação dos concretos. A Figura 5.2 apresenta uma imagem da amostra da areia utilizada no concreto.

Tabela 5.2 – Quantidade de areia passante em cada malha a partir de 750g de material.

Areia média		
Malha	Abertura (mm)	Passante (%)
600	0,6	66,91
500	0,5	47,93
350	0,35	24,99
300	0,3	22,14
200	0,2	2,94
Fundo	-	0

Fonte: [autoria própria].

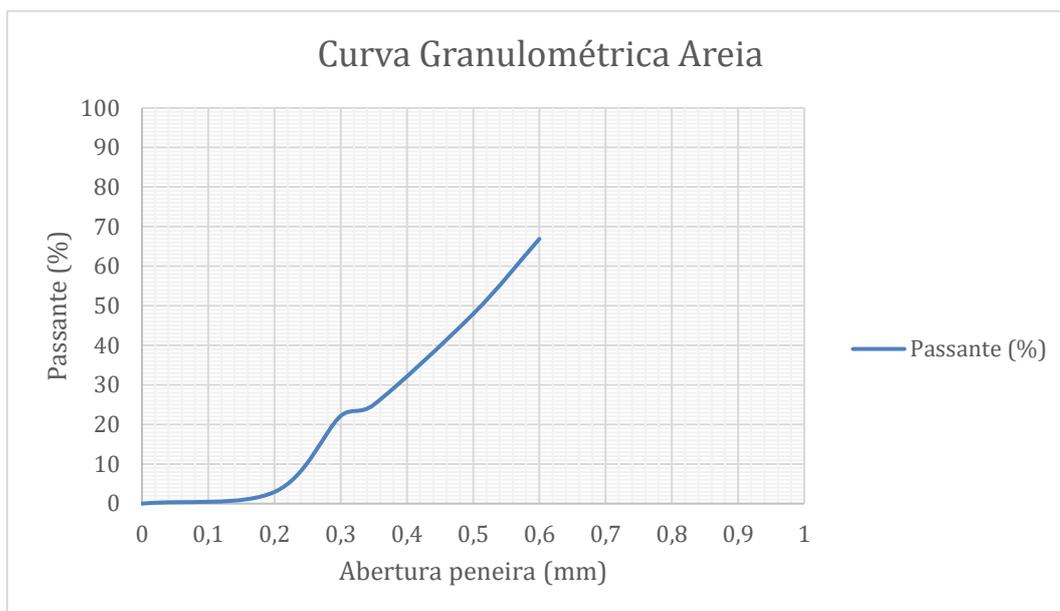


Figura 5.1 – Distribuição granulométrica da areia média [autoria própria].



Figura 5.2 – Areia média [autoria própria].

De acordo com a Figura 5.1, observou-se larga distribuição granulométrica para a areia, ao qual não se limita a um único tamanho de partículas e desta forma ocorre melhor empacotamento do material.

5.2.2 Granulometria do agregado graúdo

A Tabela 5.3 apresenta o resultado da distribuição granulométrica da brita após separação da fração grossa e a Figura 5.3 ilustra a respectiva curva granulométrica obtida a partir deste resultado de granulometria. Ressalta-se também que apenas agregados com dimensões na faixa de 4,8 mm a 9,5 mm

(que se enquadra como brita 0) foram utilizados na preparação do concreto. A Figura 5.4 apresenta uma imagem da amostra de brita 0 utilizada no concreto.

Tabela 5.3 – Quantidade de brita passante em cada malha a partir de 1,5kg de material.

Brita		
Malha	Abertura (mm)	Passante (%)
3/8"	9,5	74,55
1/4"	6,3	49,35
4	4,75	25,59
Fundo	-	0

Fonte: [autoria própria].

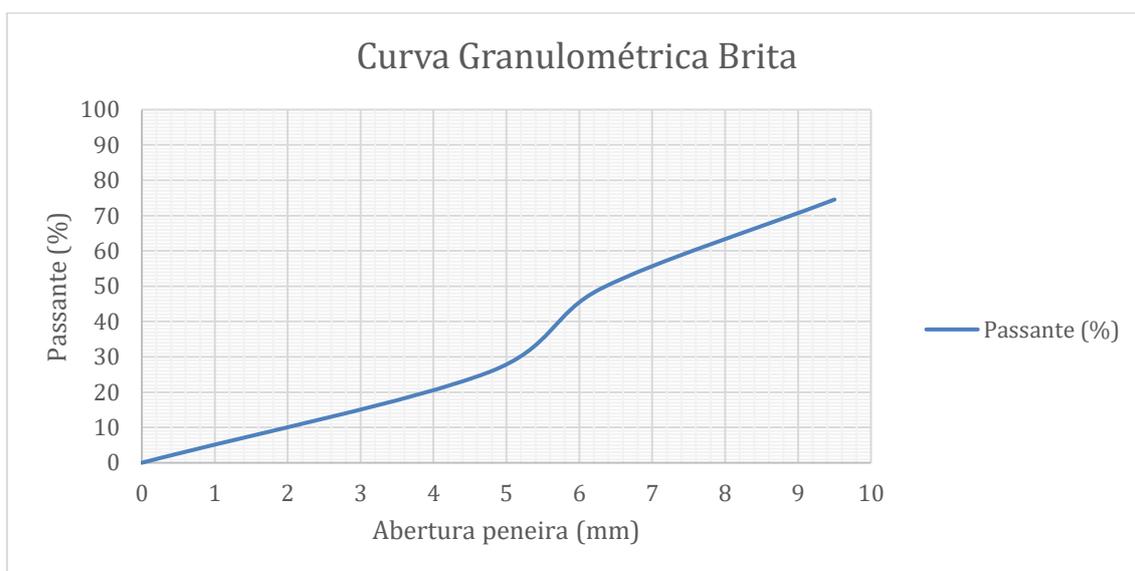


Figura 5.3 – Distribuição granulométrica da brita [autoria própria].



Figura 5.4 – Agregado graúdo convencional (Brita 0) [autoria própria].

Referente ao RCC, a Tabela 5.4 apresenta os resultados da distribuição granulométrica do RCC após a etapa de trituração e separação da fração grossa (>9,5 mm) e a Figura 5.5 ilustra a respectiva curva granulométrica obtida. Posteriormente, esta distribuição foi utilizada procurando-se dessa forma se aproximar da mesma granulometria da brita 0, entre 4,8 mm a 9,5mm. A Figura 5.6 apresenta uma imagem da amostra dos agregados RCC utilizados no concreto.

Tabela 5.4 - Quantidade de RCC passante em cada malha a partir de 1 kg de material.

Resíduo de construção civil		
Malha	Abertura (mm)	Passante (%)
3/8"	9,5	77,60
1/4"	6,3	52,78
4	4,75	28,16
Fundo	0	0

Fonte: [autoria própria].

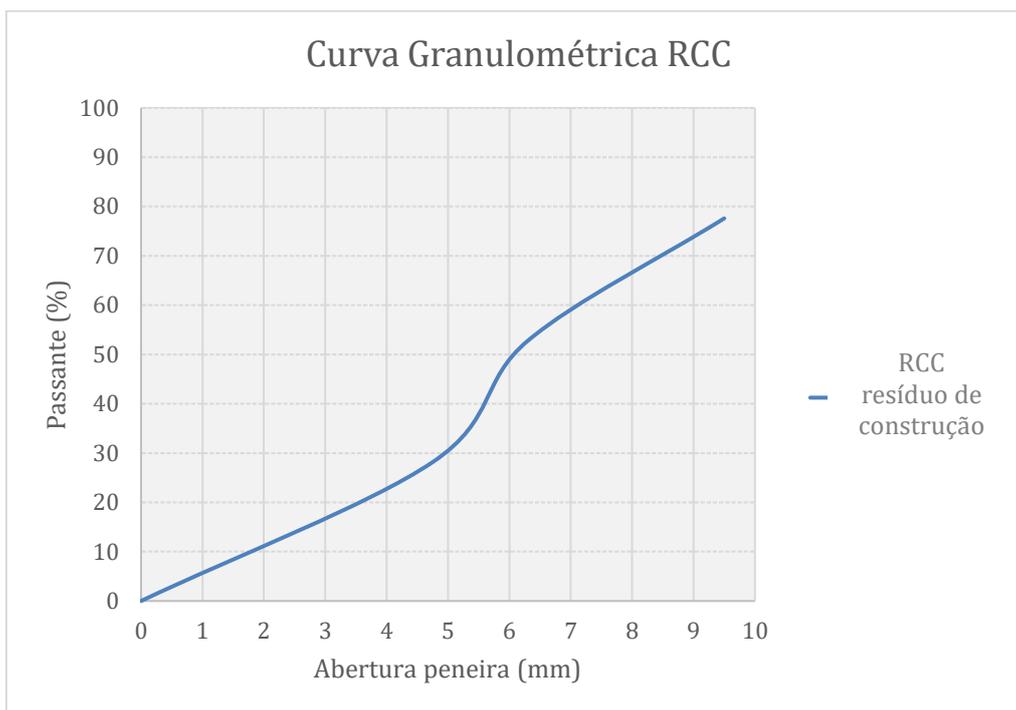


Figura 5.5 – Distribuição granulométrica do resíduo de construção civil [autoria própria].



Figura 5.6 – Agregado graúdo proveniente do RCC [autoria própria].

Conforme as Figuras 5.3 e 5.5, observou-se o mesmo resultado apresentado para a areia, neste caso obteve-se larga distribuição granulométrica da brita 0 e do RCC, o que leva ao melhor empacotamento do material, visto que os agregados não se limitaram a um único tamanho específico.

5.2.3 Absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente dos agregados graúdos

Os resultados do ensaio de absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente da brita 0 e do RCC, estão apresentados na Tabela 5.5. Os resultados referem-se medição de uma porção composta por 10 agregados de cada tipo de material.

Tabela 5.5 – Resultados da absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente dos agregados graúdos.

Caracterizações dos agregados graúdos			
	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Densidade aparente (g/cm ³)
Brita 0	1,89	5,19	2,77
Resíduo de Construção Civil	18,47	31,67	1,73

Fonte: [autoria própria].

Diante dos resultados apresentados na Tabela 5.5 pode-se notar que o RCC apresenta porosidade muito superior ao agregado convencional (brita 0), o que refletiu em maior absorção de água e menor densidade do material. Estes resultados estão em acordo com os mencionados por Ângulo e Figueiredo [25], visto que a porosidade para esse tipo de material é superior à 10%, principalmente quando o RCC é obtido a partir de cerâmicas vermelhas, que segundo os autores, possui a maior porosidade entre os diversos tipos de resíduos encontrados no setor da construção civil e também absorção de água de até 24%.

Os resultados obtidos também estão em conformidade com Lima [26], que ressalta a diferença de materiais através da absorção de água, apontando que os RCC por serem materiais mais porosos apresentam absorção de água superior aos materiais naturais e menores densidades.

5.3 Caracterização dos corpos de prova de concreto de cimento Portland e concreto com ligante geopolimérico

As composições analisadas dos corpos de prova referem-se ao concreto de cimento Portland com brita (CPB), concreto de cimento Portland com RCC (CPR), concreto de cimento Portland com RCC umedecido (CPRU), concreto geopolimérico com brita (CGB) e concreto geopolimérico com RCC (CGR).

5.3.1 Absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente

A Tabela 5.6 apresenta os resultados das análises de absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente dos corpos de prova de concreto de cimento Portland e concreto de ligante geopolimérico. Os resultados referem-se à medição de um corpo de prova para cada composição.

Tabela 5.6 – Caracterização da absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente dos corpos de prova de concreto de cimento Portland e concreto de ligante geopolimérico.

Caracterizações dos corpos de prova			
Composições	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Densidade aparente (g/cm ³)
CPB	6	14,97	2,42
CPR	11,78	25,17	2,13
CPRU	13,82	26,37	1,90
CGB	16,42	30	1,87
CGR	20,50	37,66	1,83

Fonte: [autoria própria].

Entre as composições analisadas, o CPB apresentou os melhores resultados, isto é, menor porosidade aparente (14,97%), menor absorção de água (6%) e maior densidade aparente (2,42 g/cm³), o que provavelmente resultará em melhor resistência mecânica. Por outro lado, referente aos outros resultados, é possível notar que as composições que utilizaram o RCC apresentaram maior absorção de água e porosidade, independentemente de ser

concreto de cimento Portland ou concreto de ligante geopolimérico. Isto se deve preferencialmente à maior presença de poros neste tipo de agregado, conforme discutido no item 5.2.3, e também a um possível menor grau de adensamento devido à maior irregularidade do formato desses agregados, ainda que estivessem em similar curva granulométrica dos agregados de brita. Em relação ao uso do RCC no estado seco e úmido, não ocorreu a influência de forma significativa nos resultados obtidos, conforme apresentado pelas composições CPR e CPRU.

Por meio de uma análise comparativa dos resultados obtidos das composições a partir de cimento Portland e de geopolímero, para o mesmo tipo de agregado, fica evidente a influência da matriz, uma vez que ligante geopolimérico resultou em materiais mais porosos e com maior absorção de água, tanto para a brita quanto para o agregado RCC.

Em relação a absorção de água $\leq 6\%$ estabelecido pela ABNT NBR 9781:2013, apenas a composição CPB apresentou essa característica apropriada para aplicação de pavimentos intertravados, sendo que para as demais há ainda a necessidade de modificação no traço ou melhoria no processo de conformação para atender ao requisito proposto por norma.

5.3.2 Resistência à compressão

Os valores do ensaio de resistência à compressão uniaxial para cada composição (CPB, CPR, CPRU, CGB e CGR) estão apresentados na Figura 5.7 para 7, 14 e 28 dias de idade. Foi realizado a medição em 3 corpos de prova para cada composição analisada e os desvios dos valores médios não foram superiores a 5%.

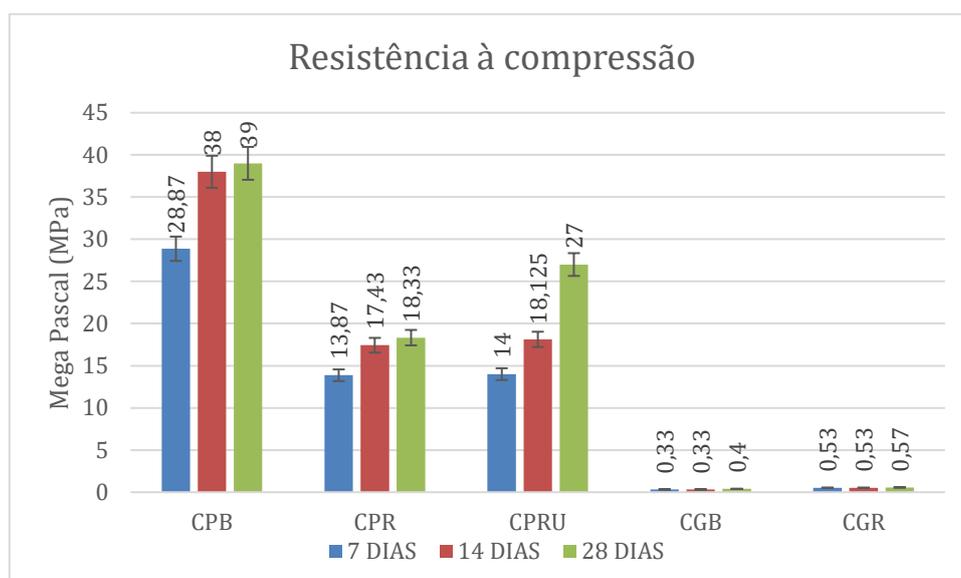


Figura 5.7 – Resistência à compressão axial dos corpos de provas das composições de concretos de cimento Portland e de ligante geopolimérico com diferentes agregados, brita e RCC [autoria própria].

A composição CPB obteve resistência de 39 MPa aos 28 dias de cura, o que torna apropriado de acordo com a ABNT NBR 9781:2013 na aplicação de pavimento intertravado para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais, uma vez que para estas funções o pavimento demanda de resistência a compressão aos 28 dias ≥ 35 MPa. Esta resistência à compressão era esperada, não só devido à menor porosidade e maior adensamento (Tabela 5.6), mas também, visto que essa dosagem do concreto de referência (CPB) foi baseado no estudo realizado por Vaz et al. [91], que obteve resistência de 49,32 MPa aos 28 dias de cura utilizando o método de conformação por peças prensadas. Segundo Pirola [16], o método de conformação dos corpos de prova adotado por Vaz et al [91] resulta em melhor compactação do concreto através da redução do volume de vazios e, conseqüentemente, o aumento da resistência mecânica, o que justifica a diferença de resistência obtida no atual estudo (39 MPa) por ter utilizado o processo de conformação por peças dormidas.

Quando ocorre a substituição do agregado convencional por RCC pode-se notar através das composições CPR e CPRU que a resistência a compressão reduziu significativamente, atingindo respectivamente 18,33 MPa e 27MPa aos 28 dias, caracterizando as composições como impróprias para aplicação de

pavimentos intertravados. Resultados similares são mencionados na literatura por Stroher et al. [30] com a substituição parcial do agregado graúdo convencional por RCC, que resultou na redução de resistência mecânica. O autor ressalta em seu estudo que a substituição de 50% do agregado graúdo convencional por RCC, a partir de materiais cerâmicos, comprometeu negativamente em aproximadamente 31,4% da resistência de compressão final. Esses resultados também se aproximam dos encontrados por Filho et al. [31] que obtiveram uma redução de 36,26% da resistência a compressão quando substituído o agregado graúdo convencional por 30% de RCC.

Ainda com relação aos concretos de cimento Portland com RCC, comparando os resultados entre as composições CPR e CPRU, ficou evidente que o ajuste da quantidade de água utilizando RCC úmido, é necessário para manter a relação água/cimento previamente estabelecida, evitando que o agregado absorva a água disponível para as reações de hidratação e ocorra defeitos na etapa de moldagem dos corpos de prova, e desta forma resultando em melhor resistência, neste caso 47,3% a mais comparativamente ao concreto com o agregado RCC seco [27].

Observando as composições que utilizaram o ligante geopolimérico notou-se que os resultados não foram satisfatórios para aplicação em pavimentos intertravados. Ambas as composições ficaram abaixo do esperado, respectivamente as resistências à compressão foram de 0,4 MPa para a composição CGB e 0,57 MPa para a composição CGR aos 28 dias de cura. Estes resultados não eram esperados, visto que a literatura menciona como principal característica dos geopolímeros a elevada resistência à compressão em menores tempos de cura. A composição que utilizou RCC gerou uma resistência à compressão levemente superior à da composição com agregado convencional e este resultado também não era esperado, uma vez que o RCC é mais fraco comparado ao agregado convencional e a tendência seria a perda de resistência à compressão para a composição com este tipo de agregado, conforme ocorrido para as composições CPR e CPRU quando comparado ao CPB. Por outro lado, diferentemente do concreto de cimento Portland, que necessita de água disponível para reações de hidratação, a elevada absorção

de água do RCC (18,47%) em relação à brita (1,89%), pode ter favorecido a uma melhor penetração da fase ligante geopolimérica, resultando assim em uma melhoria, ainda que pequena, na resistência mecânica.

5.3.3 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

Esta análise teve como finalidade identificar o tamanho dos poros presentes nas composições conformadas. O ensaio foi realizado após a resistência à compressão (28 dias de idade), que facilitou a coleta de pequenas amostras necessárias para o procedimento. A distribuição do tamanho dos poros para todas as composições estudadas (matriz dos concretos) pode ser observada na Figura 5.8.

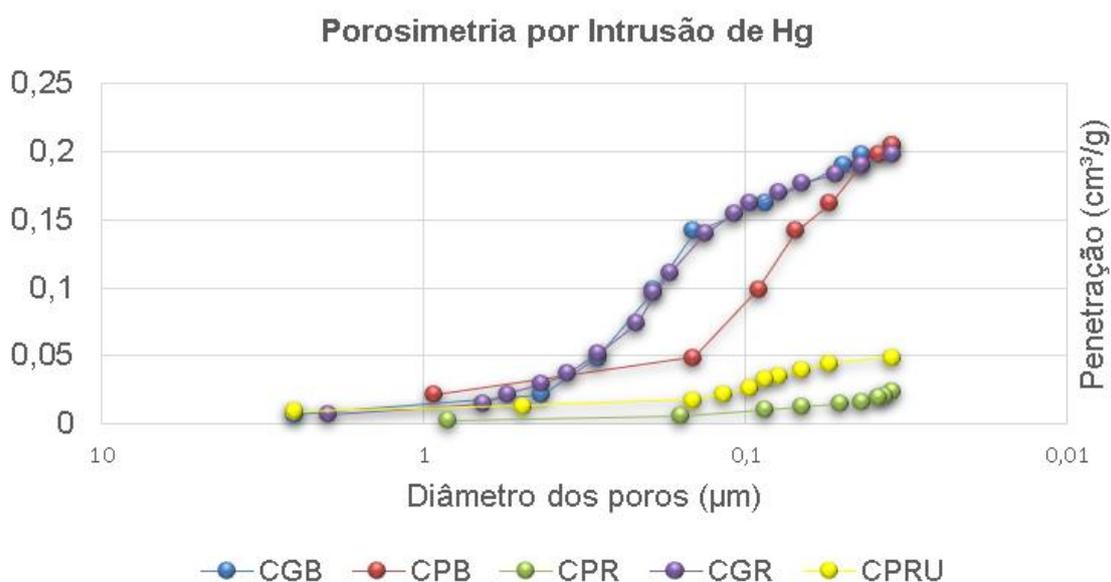


Figura 5.8 – Distribuição dos tamanhos dos poros obtidos por porosimetria de Hg para os corpos de prova de concreto de cimento Portland e de ligante geopolimérico com diferentes agregados, brita e RCC [autoria própria].

De acordo com a Figura 5.8 pode ser observado que:

Para todas as composições, as matrizes geopoliméricas e de cimento Portland apresentaram 80 % do tamanho dos poros inferiores a 1 µm. Analisando os corpos de prova, as matrizes geopoliméricas mostraram homogeneidade na distribuição do tamanho dos poros. Por outro lado, observou uma pequena

variação no tamanho dos poros das matrizes de cimento Portland, que pode estar ligado devido a hidratação do ligante, levando a maior formação de etringitas nas regiões dos poros. Segundo Mehta e Monteiro [22] diâmetros de poros maiores que 10 μm são considerados poros grandes, provenientes de defeitos de moldagem ou matriz cimentícia com pouca hidratação. Desta forma, observou-se que todas as composições apresentaram somente poros pequenos.

5.3.4 Caracterização microestrutural

Os resultados obtidos pela análise de microscopia eletrônica de varredura foram coletados de corpos de prova de concretos de cimento Portland e geopolimérico, ambos após 28 dias de cura, priorizando-se observações entre a matriz cimentícia empregada e a aderência dos agregados. Ressalta que a composição CPR não foi analisado por esta técnica, visto que a composição CPRU apresentou melhor resultado de resistência mecânica, fato que pode estar diretamente ligado a uma melhor interação matriz/agregado.

A Figura 5.9 apresenta a micrografia do corpo de prova CPB e observou-se pela micrografia da Figura 5.9A que o agregado (AG) aderiu bem na matriz de cimento Portland (CP), resultando em poucos vazios entre eles na região da interface. Também pode ser observado pelo círculo E demarcado na Figura 5.9A uma possível formação de etringita dentro de uma cavidade, local propício para este tipo de formação, que por meio de um aumento de resolução na imagem confirmou a presença de agulhas de etringitas, conforme a Figura 5.9B.

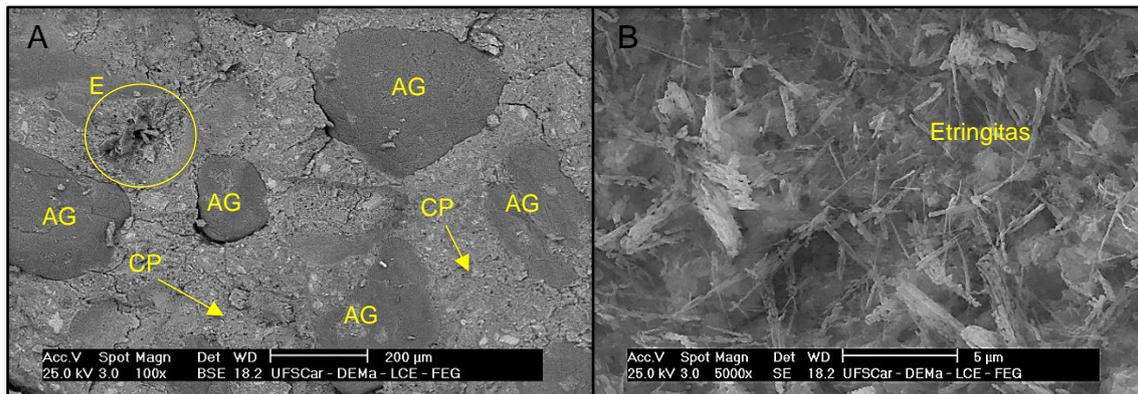


Figura 5.9 – Micrografias obtidas por Microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura do corpo de prova de concreto de cimento Portland com brita (CPB) [autoria própria].

A micrografia do corpo de prova CPRU está apresentada na Figura 5.10. Pode-se observar pela Figura 5.10A que a matriz de cimento Portland está compactada e densa (superfície de fratura), sem a presença de poros profundos e defeitos de fratura. Em adição, também pode ser observado nas micrografias das Figura 5.10B e 5.10C a presença de agulhas de etringita em pequenas cavidades da matriz cimentícia. Essas regiões podem ter sido resultado do destacamento de agregados miúdos. A formação de agulhas de etringita também foi observada em outros pontos da matriz, conforme a Figura 5.10D.

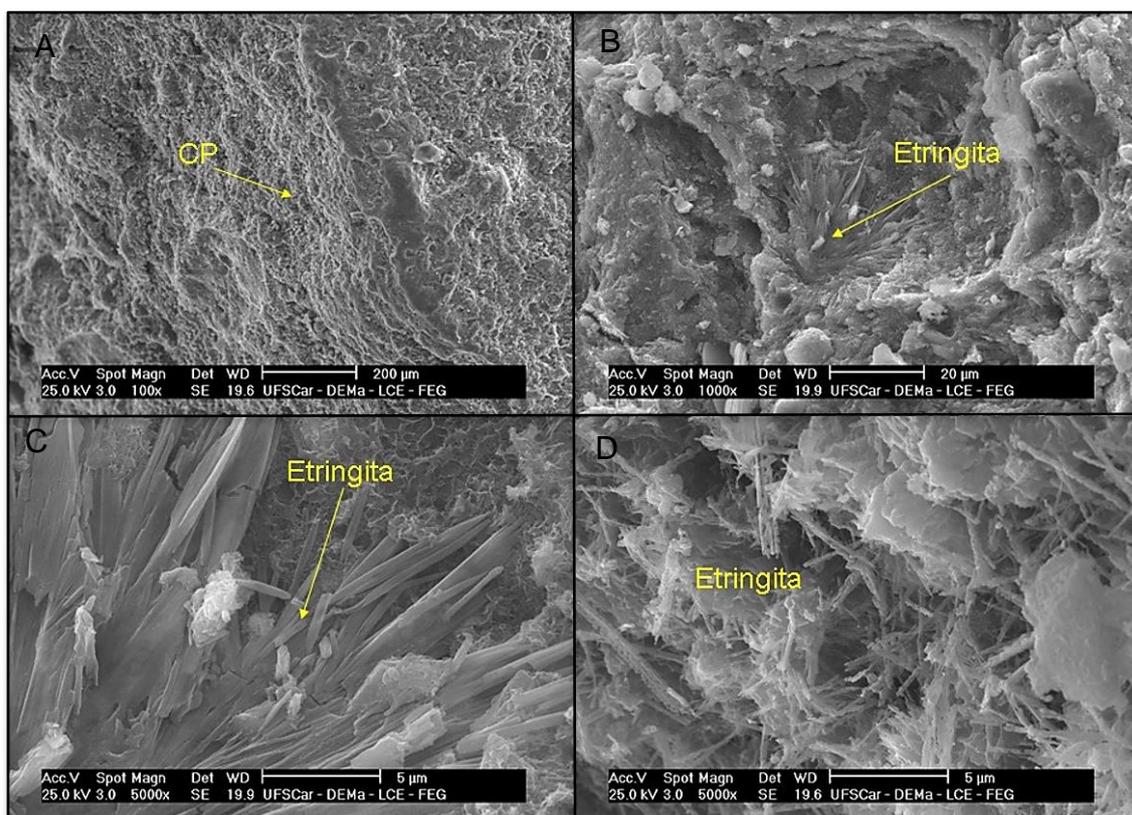


Figura 5.10 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura interface do corpo de prova de cimento Portland com agregado RCC úmido (CPRU) [autoria própria].

A Figura 5.11 apresenta a micrografia da região de fratura do corpo de prova CGB, em que foi possível observar a matriz geopolimérica. Por meio das imagens (Figura 5.11A e 5.11B), pode-se notar partículas escuras em excesso que são caracterizadas como partículas de metacaulim (M) que não reagiram ao processo de geopolimerização, conforme mencionado por Rocha [94]. Com o objetivo de comprovar a presença das partículas de metacaulim, foi realizado no ponto 1 da Figura 5.11B a análise química elementar por espectroscopia de raios X (EDS), cujo resultado apresentado na Tabela 5.7 e na figura 5.12, indica uma razão atômica Si/Al semelhante à do metacaulim empregado nesse trabalho. Além disso, observou-se excesso de partículas brancas que possivelmente representam partículas de sódio (Na) proveniente do ativador alcalino que não participaram da geopolimerização. Dessa forma, o baixo grau de geopolimerização ou até mesmo a inexistência da geopolimerização resultaram

nos mais baixos valores de resistência mecânica entre todas as composições estudadas (Figura 5.7).

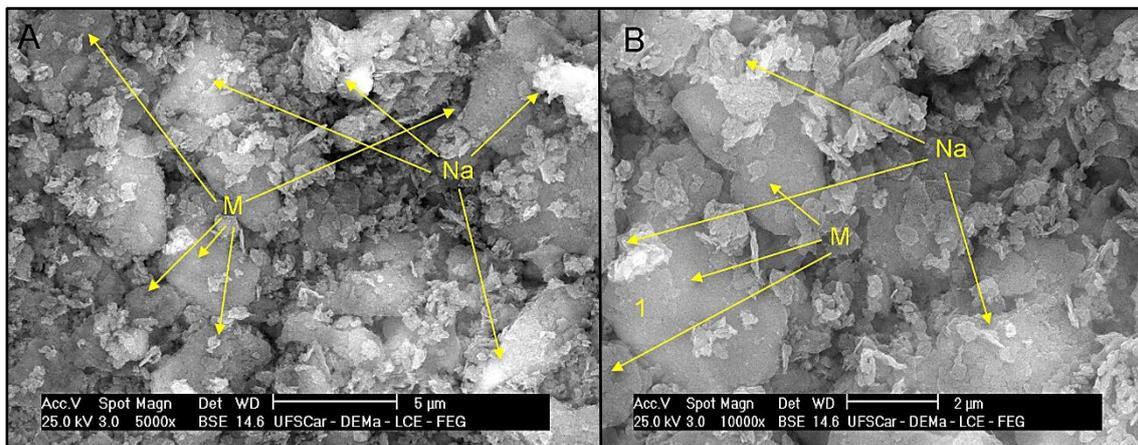


Figura 5.11 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura do corpo de prova de ligante geopolimérico com brita (CGB) [autoria própria].

Tabela 5.7 – Análise química elementar por espectroscopia de raios X (EDS) do ponto 1 demarcado na Figura 5.11B.

Ponto 1	
Silício (%at)	18,36
Alumínio (%at)	16,69
Outros (%at)	64,95

Fonte: [autoria própria].

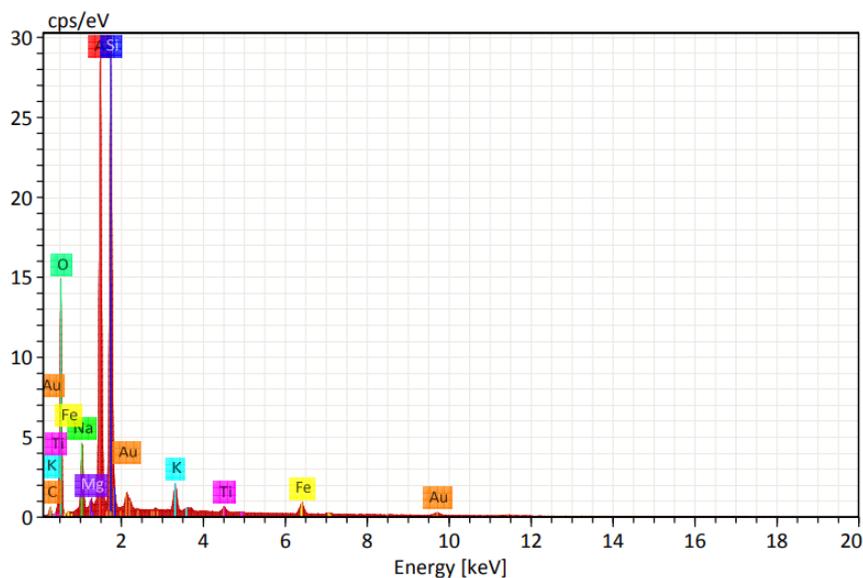


Figura 5.12 – Análise química elementar por EDS no ponto 1 demarcado na Figura 5.11B [autoria própria].

Outro fator relacionado com as partículas de sódio que não reagiram ao processo de geopolimerização foi claramente evidenciado através da imagem do corpo de prova que está apresentada na Figura 5.13. Pode-se observar que ocorreu elevada exsudação do sódio proveniente do ativador alcalino na borda do corpo de prova que não foi vedado para o processo de cura, isto possivelmente devido ao excesso de ativador alcalino que não reagiu ao processo de geopolimerização.



Figura 5.13 – Imagem do fenômeno de exsudação do sódio na superfície do corpo de prova de ligante geopolimérica com brita (CGB) com ativador NaOH [autoria própria].

A Figura 5.14 apresenta micrografia da superfície de fratura do corpo de prova de ligante geopolimérico com agregado RCC (CGR). Pode-se observar a presença de trincas (F) que podem ter sido geradas durante a compressão e preparação da amostra, mas também a presença de poros (P) na matriz, anteriormente avaliada (Tabela 5.6). É possível também notar que não deve ter havido boa aderência matriz/agregado (ag), visto que na região da interface os contornos estão aparentemente soltos (contornos livres e escuros), mas ainda se apresentam íntegros. Já em relação a Figura 5.14B pode-se notar na região analisada, que a matriz apesar de aparentar mais compacta, possui partículas de metacaulim e de sódio que não reagiram na geopolimerização. A Tabela 5.8 e Figura 5.15 representam a análise de EDS realizado no ponto P da micrografia da Figura 5.14B.

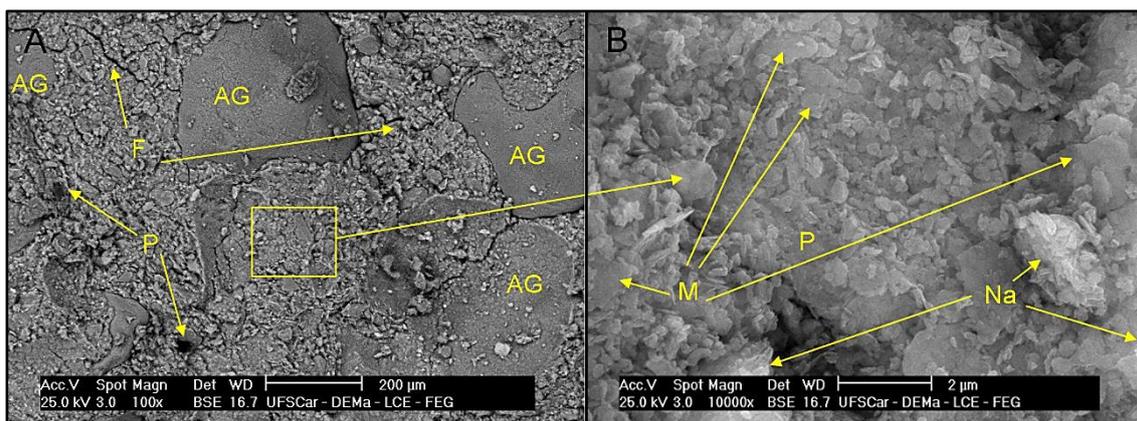


Figura 5.14 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura do corpo de prova de concreto de ligante geopolimérico com agregado RCC (CGR) [autoria própria].

Tabela 5.8 - Análise química elementar por espectroscopia de raios X (EDS) do ponto P demarcado na Figura 5.14B

Ponto P	
Silício (%at)	19,98
Alumínio (%at)	13,59
Outros (%at)	66,43

Fonte: [autoria própria]

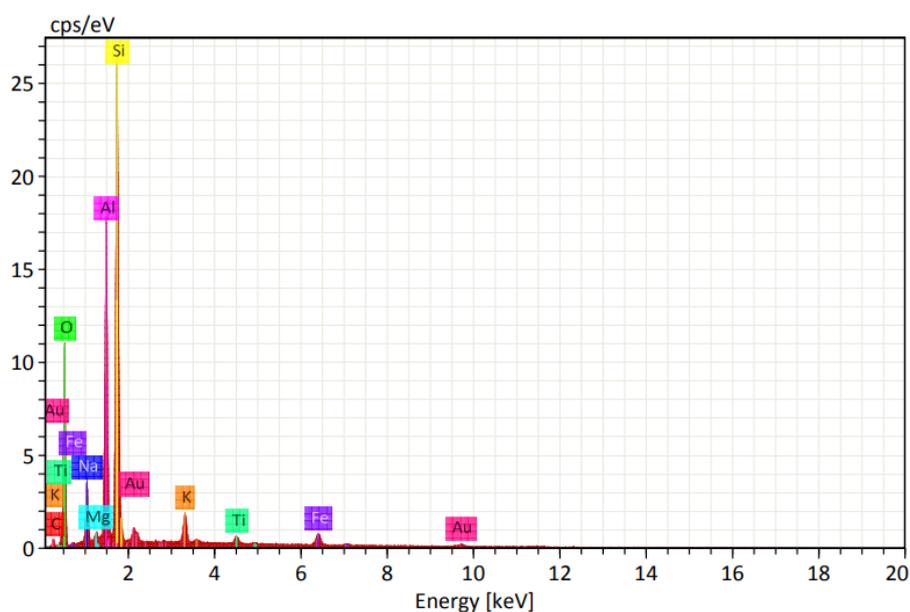


Figura 5.15 - Análise química elementar por EDS no ponto P demarcado na Figura 5.14B [autoria própria].

Assim, vale ressaltar que esses fatores, porosidade, reação incompleta e falta de adesão da matriz com os agregados, estão em sintonia com os baixos valores de resistência mecânica à compressão obtidos para essa composição (Figura 5.7).

5.4 Envelhecimento Acelerado dos corpos de prova das composições selecionadas

A Figura 5.16 apresenta imagens dos corpos de prova após o ensaio de envelhecimento acelerado por imersão em água e secagem. Para este ensaio selecionou-se a composição CPB que apresentou propriedades que atendem aos requisitos para aplicação em pavimentos intertravados e as composições CPR e CPRU que por meio de melhorias na dosagem do concreto (traço) e/ou no processo de conformação podem ser aptas para esta aplicação. As composições de concreto de ligante geopolimérico não foram avaliadas devido aos valores de resistência mecânica extremamente baixos, independentemente do tipo de agregado utilizado.



Figura 5.16 – Imagens dos corpos de prova das composições selecionadas após ensaio de envelhecimento acelerado: (a) CPB; (b) CPRU e (c) CPR [autoria própria].

Por uma análise visual após o ensaio notou-se que os corpos de prova apresentaram alguns aspectos diferentes quando comparados aos corpos de

prova originais, tais como, uma coloração mais branca e superfícies mais ásperas, provavelmente indícios do início de um processo de degradação.

5.4.1 Absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente

A Tabela 5.9 apresenta os resultados da caracterização da absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente dos corpos de prova antes (para meio comparativo) e após o envelhecimento acelerado. Os resultados referem-se à medição de um corpo de prova para cada composição.

Tabela 5.9 - Caracterização da absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente dos corpos de prova de concreto de cimento Portland antes e após ensaio de envelhecimento acelerado.

Caracterizações dos corpos de prova						
Composições	Absorção de água (%)		Porosidade aparente (%)		Densidade aparente (g/cm ³)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
CPB	5,98	7,5	15	17,03	2,49	2,15
CPR	11,6	13,26	25,03	27,87	2,17	1,73
CPRU	13,75	15,45	26,25	28,16	1,94	1,79

Fonte: [autoria própria].

Os resultados apresentados na Tabela 5.9 evidenciam claramente que durante o envelhecimento houveram modificações nas características microestruturais de todos os corpos de prova com aumento na porosidade, que refletiu em maiores absorções de água e menores densidades. Certamente essas alterações comprometem a durabilidade dessas composições após um período de aplicação.

5.4.2 Resistência à compressão

A Figura 5.17 apresenta os resultados de resistência à compressão antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado para os corpos de prova das composições CPB, CPR e CPRU.

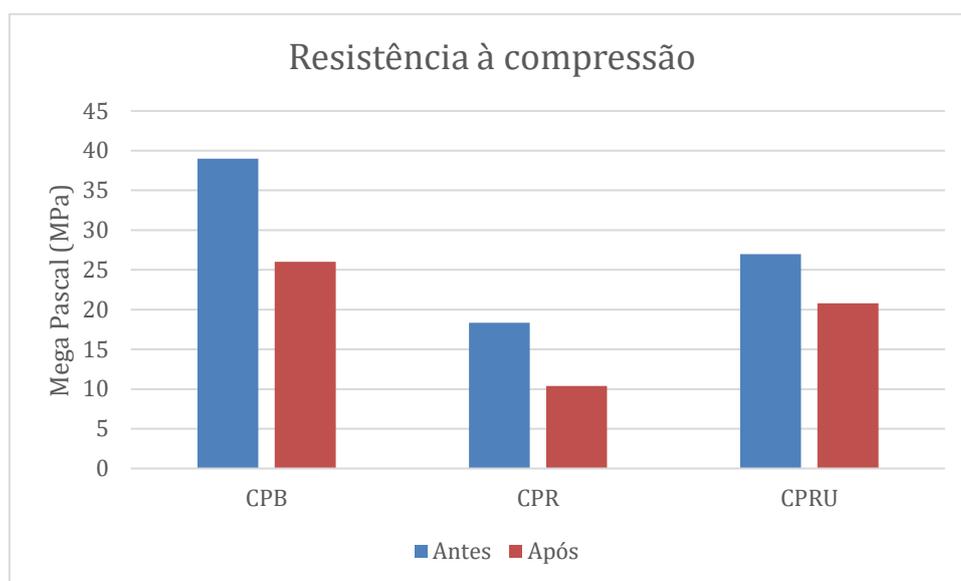


Figura 5.17 – Resistência à compressão dos corpos de prova de concreto de cimento Portland com diferentes agregados, brita (CPB), RCC (CPR) e RCC úmido (CPRU) após o ensaio de envelhecimento acelerado [autoria própria].

O ensaio de resistência à compressão após o envelhecimento dos corpos de prova mostrou que houve uma diminuição significativa nos valores de resistência em todas as composições avaliadas. Esta perda de resistência está relacionada a perda de durabilidade através do comprometimento da microestrutura das amostras, o que ocasionou em maior porosidade em todos os corpos de prova, conforme observado na Tabela 5.9.

Em relação aos corpos de prova, o CPB apresentou resistência de 26,02 MPa e perda de aproximadamente 33,28% referente a resistência antes do ensaio de envelhecimento. O CPR apresentou resistência de 10,4 MPa, sendo a maior perda de resistência entre as composições analisadas, aproximadamente 43,26% de perda em relação a resistência original. Por fim, a composição CPRU apresentou resistência de 20,81 MPa, tornando-a a composição analisada com a menor perda, aproximadamente 22,92% de perda de resistência à compressão comparado ao resultado obtido antes do ensaio de envelhecimento e ao resultado do concreto CPRU. Provavelmente este fato pode estar ligado a uma maior adesão dos agregados, que ainda que muito porosos, neste caso estavam úmidos e poderiam ter propiciado um meio reacional de hidratação mais favorável na interface.

5.4.3 Caracterização microestrutural

Assim como realizado para os corpos de prova antes do ensaio de envelhecimento, foram observadas por análises de microscopia eletrônica de varredura as microestruturas das superfícies de fratura dos corpos de prova dos concretos CPB e CPRU, composições que apresentaram melhores resistências após envelhecimento acelerado.

A Figura 5.18 apresenta a micrografia referente ao corpo de prova CPB envelhecido cuja matriz cimentícia (CP) aparenta ter permanecido compacta com boa aderência ao agregado (AG), Figura 5.18A. Com um detalhamento maior a Figura 5.18B apresenta a região de poro, que é uma região propícia à formação de etringita, conforme observado antes do envelhecimento acelerado, Figura 5.9. Neste caso, porém, é intrigante a presença de diferentes morfologias localizadas junto a poucas agulhas de etringita (E), induzindo à ideia de possíveis agulhas de etringitas degradadas (ED).

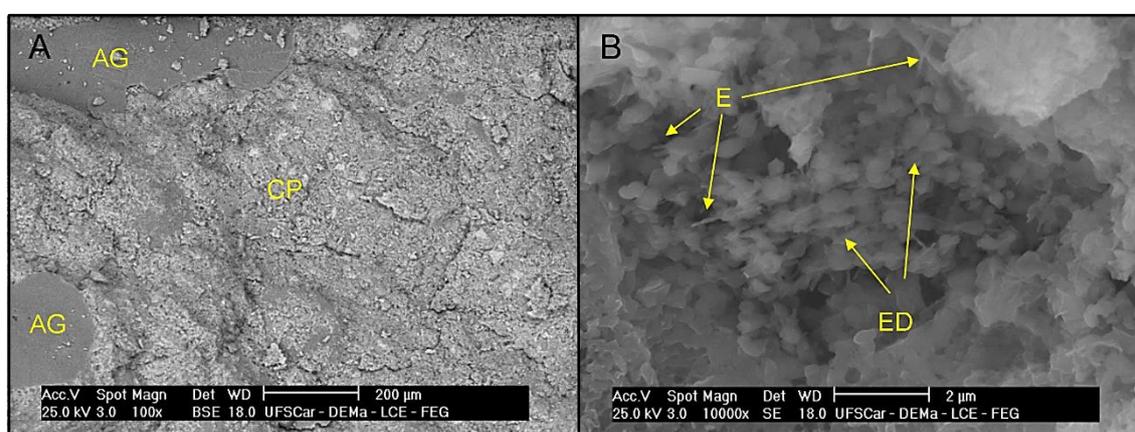


Figura 5.18 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura do corpo de prova de cimento Portland com agregado brita (CPB) após ensaio de envelhecimento acelerado [autoria própria].

A Figura 5.19 apresenta as micrografias obtidas da análise do corpo de prova de concreto Portland com agregado RCC úmido após o ensaio de envelhecimento acelerado.

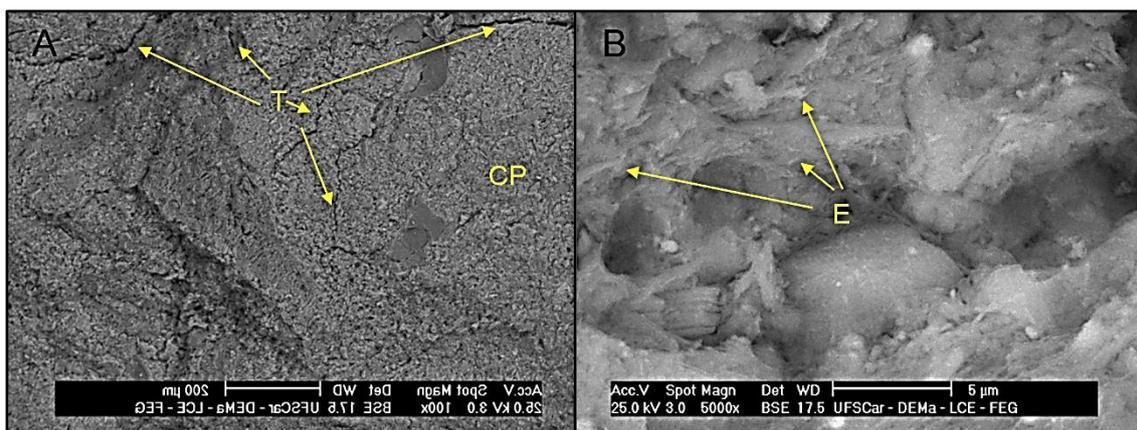


Figura 5.19 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura do corpo de prova de cimento Portland com agregado RCC úmido (CPRU) após ensaio de envelhecimento acelerado [autoria própria].

Na Figura 5.19A pode-se notar que apesar da matriz cimentícia estar aparentemente compacta, há a presença de trincas que podem ter sido formadas no ensaio de compressão e preparação da amostra, como também serem consequência de um processo inicial de deterioração do material quando submetido aos ciclos de aquecimento e imersão em água. Já com relação à micrografia da Figura 5.19B, tal como concreto com brita (CPB) após o envelhecimento, poucas agulhas de etringita podem ser observadas, e isso fica ainda mais evidente quando se compara regiões de poro desse concreto antes do envelhecimento (Figura 5.10C) onde se podia observar essas regiões completas com a etringita. Provavelmente, a degradação dessa fase ocorreu no envelhecimento.

Assim, independentemente do tipo de agregado, brita ou RCC, os concretos de cimento Portland, sofreram na matriz cimentícia mais o efeito do envelhecimento do que as regiões da interface matriz/agregado. Esse fato pode estar diretamente relacionado à deterioração da fase etringita favorecendo a formação de carbonato de cálcio (vaterita). Esse fenômeno também foi observado por Dias [95] quando avaliou o efeito do envelhecimento na microestrutura e comportamento mecânico dos fibrocimentos.

5.5 Análise do desempenho do metacaulim comercial utilizado

Com o objetivo de entender a baixa resistência à compressão dos corpos de prova a partir do ligante geopolimérico foram levantadas duas hipóteses: *i)* a composição mineralógica inadequada do metacaulim comercial utilizado como precursor geopolimérico, para o qual há a necessidade de se utilizar materiais predominantemente amorfos, o que resulta em maior reatividade do precursor com o ativador alcalino e, conseqüentemente, maior resistência mecânica; *ii)* a escassez de resultados na literatura que comprove a eficácia do uso de hidróxido de sódio isoladamente, visto que os trabalhos publicados relatam o uso da mistura entre hidróxidos de sódio e/ou potássio e silicatos do mesmo tipo [73, 74].

5.5.1 Difração de raios X do metacaulim comercial

Mediante as hipóteses levantadas, uma amostra do metacaulim comercial foi caracterizada por difratometria de raios X (DRX) em difratômetro D8 Advance Eco da marca Bruker, em condições de ensaio de 2θ de 5° a 90° , passo de $0,02^\circ$ e duração de 15 minutos. A Figura 5.20 apresenta o difratograma obtido acerca da cristalinidade do metacaulim comercial utilizado como precursor geopolimérico. Para determinar a cristalinidade do precursor geopolimérico, foi utilizado o software Origin.

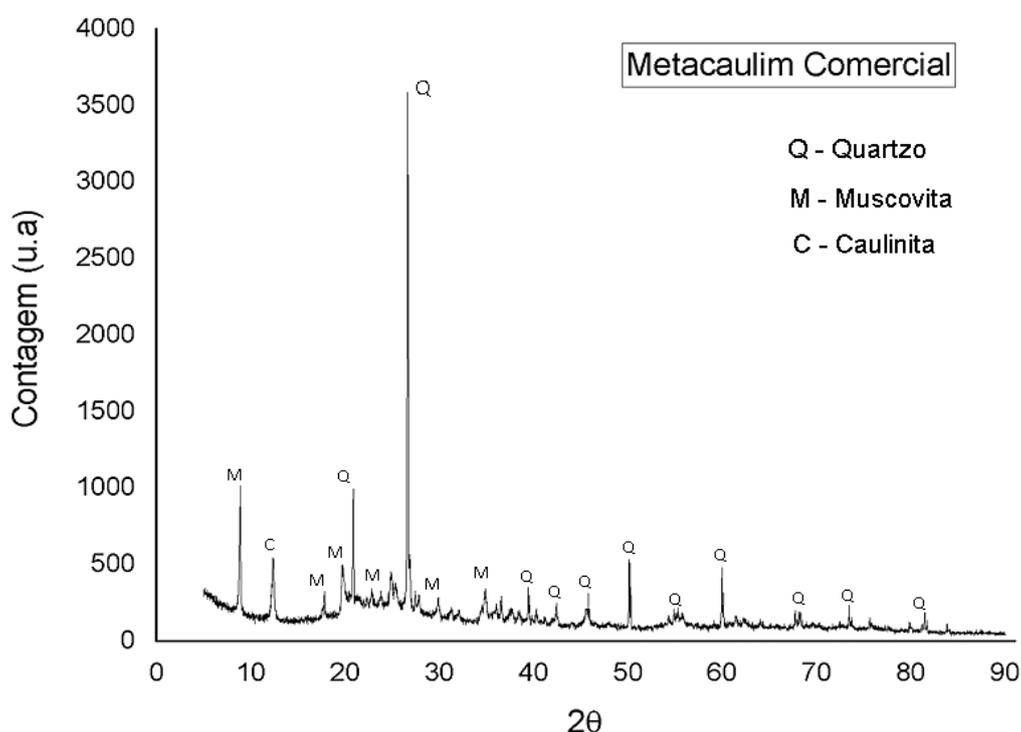


Figura 5.20 – Difratometria do metacaulim comercial [autoria própria].

De acordo com o difratograma, o metacaulim comercial apresenta alto teor de cristalinidade, aproximadamente 50% de toda a matéria prima, o que caracteriza como baixa reatividade e justifica a baixa resistência mecânica dos corpos de prova a partir deste precursor geopolimérico. Este resultado confirma com o estudo realizado por Walters e Jones [64], que relataram menor resistência à compressão para os materiais produzidos a partir de argilas caulinitas com teores de cristalinidade acima de 10%, e também aos estudos feitos pelos autores Santa [66] e Ozer e Uzun [67], que identificaram baixa resistência de compressão em composições geopoliméricas com alto teor cristalino. Baseado no processamento térmico para produção de metacaulim citado por Sperinck et al [62] é possível notar por meio do pico de caulinita situado em 2θ igual a 12° que a matéria prima não foi calcinada adequadamente, resultando em má desidroxilação da estrutura. Além do pico de caulinita, é possível notar a presença, relativamente intensa, de quartzo e muscovita, que são fases cristalinas comumente presentes no caulim. Conforme mencionado por Souza [65] toda a fração cristalina não reage ao processo de

geopolimerização, visto que esta parte exerce função de enchimento ao material produzido e diminui a resistência mecânica dos materiais.

5.6 Desempenho de diferentes metacaulins como precursor geopolimérico

Diante dos resultados apresentados para o concreto geopolimérico, analisou-se de forma comparativa o desempenho de pastas geopoliméricas a partir de metacaulins obtidos em diferentes condições de processamento. Para esta análise foram utilizados como precursores geopoliméricos um metacaulim obtido a partir do tratamento térmico (calcinação) de um caulim comercializado pela empresa Minasolo, e o próprio metacaulim comercial utilizado anteriormente também após ser submetido à calcinação; ambos nas mesmas condições de temperatura e tempo.

5.6.1 Caracterização dos novos precursores geopoliméricos

5.6.1.1 Tratamento térmico

O tratamento térmico foi realizado em um forno elétrico do tipo mufla da marca EDG sob as mesmas condições de queima de 750°C por 3 horas com taxa de aquecimento de 5°C. A Figura 5.21 mostra a imagem do tipo de forno utilizado.



Figura 5.21 – Forno elétrico tipo mufla utilizado para a calcinação do caulim e do metacaulim comercial para obtenção de precursores geopoliméricos [autoria própria].

A Figura 5.22 apresenta as imagens dos pós obtidos após o tratamento térmico comparativamente ao metacaulim comercial (sem calcinação).



Figura 5.22 – Imagens das amostras de metacaulins antes e após tratamento térmico em 750°C durante 3 horas [autoria própria]

Conforme a Figura 5.22, é possível notar a mudança de cor por parte dos diferentes metacaulins, resultando em cores mais avermelhada. Segundo Ding e Li [68], a mudança de cor ocorre em argilas compostas por óxidos corantes

(ferro e titânio) quando submetidos ao tratamento térmico em determinadas temperaturas de queima. Dessa forma, o processamento industrial realizado no metacaulim comercial não deve ter sido propriamente eficaz, visto que após a nova etapa de queima o material mudou de cor.

Após o tratamento térmico, o caulim calcinado foi analisado por fluorescência de raios X (FRX) para verificar sua composição química (Tabela 5.10).

Tabela 5.10 – Composição química elementar do caulim calcinado obtida por fluorescência de raios X.

Caulim Calcinado	
Elementos	%w
Si	49,2
Al	42,13
K	5,05
Fe	3,2
Ti	0,16
Mn	0,08
Ir	0,03
Bi	0,02
Rb	0,02
Cu	0,02
Outros	3,29

Fonte: [autoria própria].

Conforme a necessidade de trabalhar com geopolímeros com razão atômica de Si/Al igual a 2 e o caulim calcinado não atender essa razão conforme os resultados apresentados na Tabela 5.10, foi utilizado sílica coloidal como complemento ao silício necessário para satisfazer a razão atômica desejada.

5.6.1.2 Difração de raios X dos diferentes precursores

A análise de difração de raios X teve como objetivo avaliar a eficiência do tratamento térmico realizado e se foi possível obter material precursor apto na aplicação em geopolímeros. Os resultados do difratograma para o metacaulim comercial calcinado e caulim calcinado estão apresentados nas Figuras 5.23 e 5.24, respectivamente.

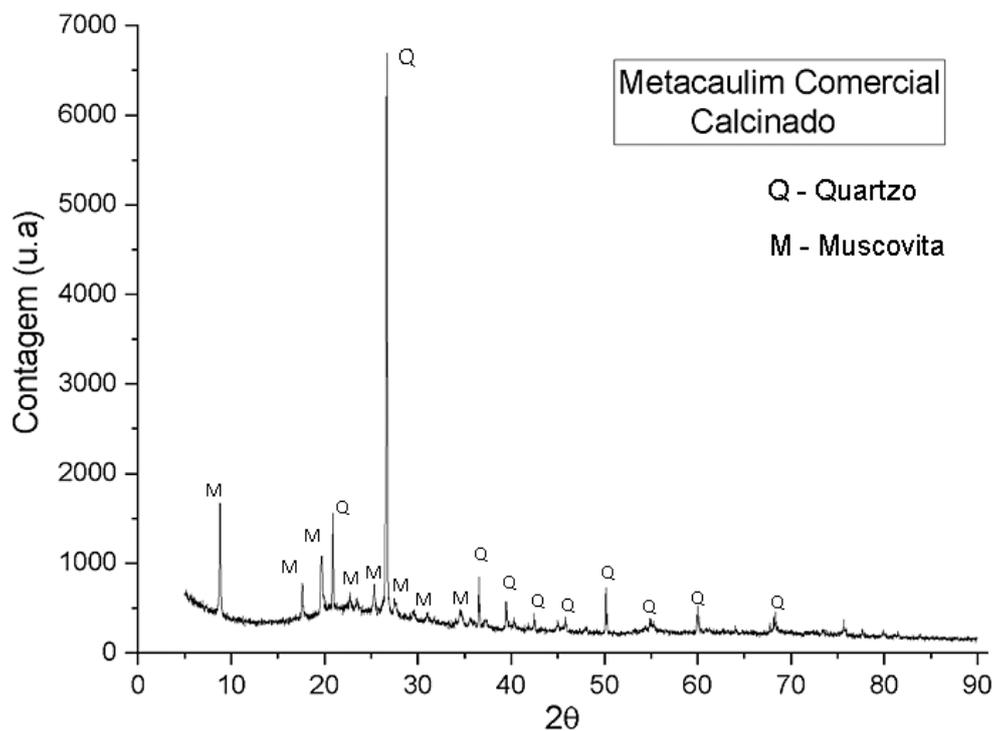


Figura 5.23 – Difratoograma do metacaulim comercial calcinado a 750°C durante 3 horas [autoria própria]

Conforme a Figura 5.23, o material manteve a cristalinidade elevada mesmo submetido ao novo processo de calcinação, resultando em aproximadamente 36% de material cristalino. É possível notar que o pico de caulinita existente no difratograma da Figura 5.20 não mais existe, o que demonstra que a calcinação foi eficiente para a desidroxilação da caulinita que estava presente. Assim, ficou evidente que a matéria prima comercializada não é de fato apropriada para ligantes geopoliméricos, pois mesmo com a nova calcinação, não houve um aumento significativo da banda amorfa do material, além de apresentar elevados teores de quartzo e mica muscovita (fração cristalina).

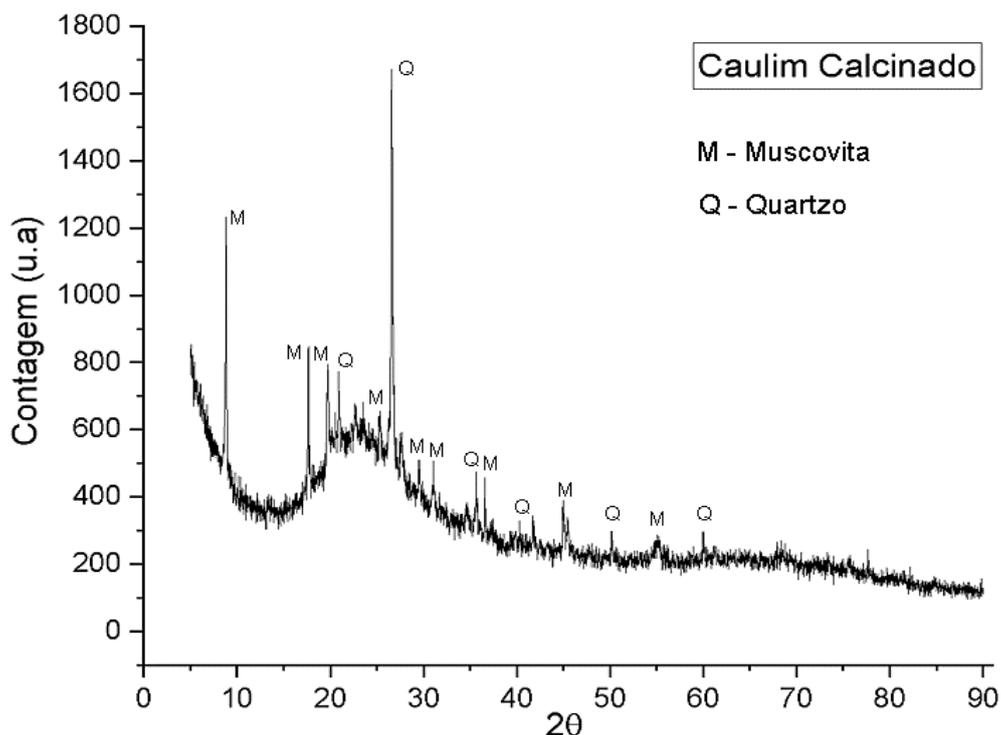


Figura 5.24 – Difratograma do caulim calcinado a 750°C durante 3 horas [autoria própria].

Ao se observar o difratograma do caulim calcinado também é possível notar a presença de quartzo e muscovita, porém em intensidades inferiores aos picos presentes no metacaulim comercial. Além disso, o caulim calcinado é composto por aproximadamente 24% de material cristalino, o que resulta em maior banda amorfa em 2θ entre 20° a 30° quando comparado ao metacaulim comercial. Diante dessas análises, o caulim calcinado possui maior quantidade de material amorfo reativo para o processo de geopolimerização, o que leva a maior resistência mecânica do material produzido a partir desse precursor geopolimérico, conforme mencionado na literatura [64, 66 e 67].

5.6.2 Conformação de corpos de prova

Após os resultados dos difratogramas foi analisado o desempenho mecânico de corpos de prova composto pelos ligantes geopolímeros, neste caso, preparados a partir do metacaulim comercial, metacaulim comercial após calcinação e do caulim calcinado. Os corpos de prova foram moldados com

dimensões de 4 cm de diâmetro e altura e submetidos ao processo de cura por 7, 14 e 28 dias. O preparo do geopolímero seguiu o mesmo procedimento mencionado no item 4.2.2.2, utilizando como solução ativadora o hidróxido de sódio em concentração de 12 mols/l e mantendo-se a relação de ativador/precursor igual a 0,35. A Figura 5.25 apresenta imagens dos corpos de prova moldados para cada composição.

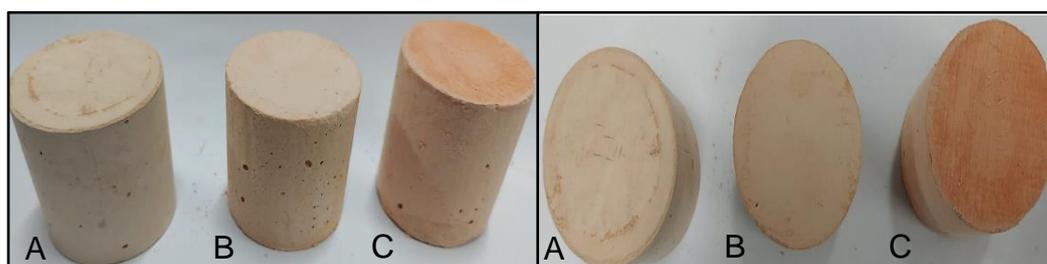


Figura 5.25 – Corpos de prova moldados com ligante geopolimérico com diferentes precursores: (a) metacaulim comercial; (b) metacaulim comercial calcinado; (c) caulim calcinado [autoria própria].

Devido ao fato dos resultados dos difratogramas do metacaulim calcinado e do caulim calcinado não apresentarem redução significativa na cristalinidade do material, analisou-se também a fim de comparação a influência do ativador alcalino no desempenho mecânico do geopolímero preparado. Foram analisadas composições de geopolímeros a partir do ativador composto por somente silicato de sódio e do ativador composto por 50% hidróxido de sódio e 50% de silicato de sódio. Para estas composições foram utilizados como precursor geopolimérico o caulim calcinado, visto que foi o precursor com maior quantidade de material amorfo. A mistura do hidróxido de sódio e silicato de sódio para a formação do ativador composto foi realizada 5 minutos antes da adição ao precursor geopolimérico.

5.6.3 Caracterizações dos corpos de prova

A caracterização destes corpos de prova foi conduzida na mesma maneira que nos corpos de prova de concreto, neste caso por meio da análise da absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente, porosidade por

intrusão de mercúrio, microestrutura e resistência à compressão. As composições referem-se ao metacaulim comercial (GM), metacaulim comercial calcinado (GMC), caulim calcinado (GCC), neste caso essas composições a partir do hidróxido de sódio em concentração de 12 mols, e a composição com o caulim calcinado a partir da mistura de hidróxido de sódio e silicato de sódio (GCCHS. A composição de caulim calcinado com o uso somente do silicato de sódio como ativador alcalino foi desconsiderada durante o processo de cura, visto que os corpos de prova a partir desta composição não foram capazes de enrijecer suficiente para realizar o desmolde.

Vale ressaltar que referente aos ativadores empregados, o hidróxido de sódio apresentou pH acima de 14, o silicato de sódio pH igual a 13 e o ativador a partir da mistura de hidróxido de sódio e silicato de sódio apresentou pH acima de 14.

5.6.3.1 Absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente

A Tabela 5.11 apresenta os resultados dos corpos de prova geopoliméricos caracterizados quanto à absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente.

Tabela 5.11 – Caracterização da absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente dos corpos de prova geopoliméricos.

Caracterizações dos corpos de prova			
Composições	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Densidade aparente (g/cm ³)
GM	55,8	54,12	0,97
GMC	50,13	50,25	1,01
GCC	49,51	50,24	1,05
GCCHS	42,9	36	1,06

Fonte: [autoria própria].

Por meio dos resultados apresentados na Tabela 5.11, nota-se que a composição a partir do metacaulim comercial (GM) apresentou a maior absorção

de água e, conseqüentemente, maior porosidade aparente entre as composições analisadas. Conforme são analisadas as composições em que o precursor apresenta menor cristalinidade, como é o caso do metacaulim comercial calcinado e caulim calcinado, ocorreu a redução da absorção de água e porosidade aparente destes corpos de prova, que pode estar relacionada à redução de material inerte que atuam apenas como enchimento nos corpos de prova e maior grau de reação (geopolimerização) da fração amorfa. Resultado semelhante é mencionado por Azevedo et al [96] que substituiu 50% do metacaulim por cerâmica vermelha com baixo teor de reatividade no processo de geopolimerização, resultando no aumento da quantidade de poros em 368%.

Referente ao uso de silicato de sódio, observou que o uso deste ativador em conjunto com a solução de hidróxido de sódio resultou em menor porosidade aparente e absorção de água quando comparado a mesma composição (GCC) com apenas hidróxido de sódio.

Ao se comparar essas características com as obtidas para os concretos geopoliméricos, isto é, com agregados (Tabela 5.6), pode-se observar que houve um aumento da absorção de água e porosidade aparente por parte desses corpos de prova apenas com a matriz ligante geopolimérica. Neste caso, a ausência dos agregados pode ter dificultado o adensamento do ligante geopolimérico, ocasionando em maior volume de poros nos corpos de prova moldados.

5.6.3.2 Resistência à compressão

A Figura 5.26 apresenta os valores obtidos do ensaio de resistência à compressão axial para os corpos de prova, ensaiados em 7, 14 e 28 dias de cura. Foi realizado a medição em 3 corpos de prova para cada composição analisada e os desvios dos valores médios não foram superiores a 5%.

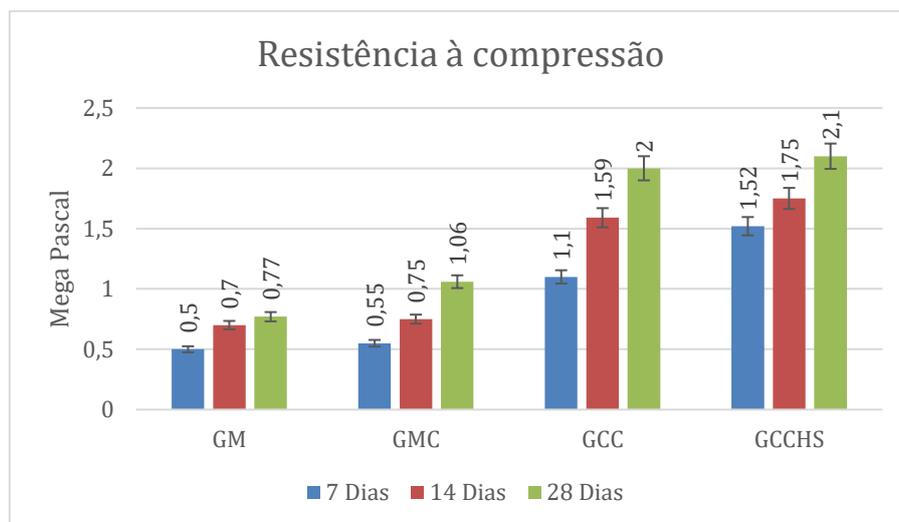


Figura 5.26 – Resistência à compressão axial dos corpos de prova geopoliméricos [autoria própria].

De acordo com os resultados do ensaio de resistência à compressão axial, pode-se observar que todas as composições apresentaram baixas resistências. Isto demonstra que as condições experimentais e/ou materiais adotadas neste trabalho, não foram apropriadas para que os resultados pudessem estar em acordo com os resultados na literatura [88 e 91], que mencionam os geopolímeros com elevada resistência a compressão, podendo ultrapassar facilmente os 50 MPa.

A composição GCCHS preparada a partir do caulim calcinado e da mistura de hidróxido de sódio com silicato de sódio apresentou a melhor resistência à compressão, aproximadamente 2,1 MPa, caracterizando-se como a maior resistência entre as composições em análise. Entretanto, o fator resistência não deve ser considerada como diferencial entre as composições analisadas, uma vez que todas as resistências obtidas foram semelhantes.

Vale mencionar que a composição GCCHS enrijeceu mais rápido comparado as demais composições que utilizaram apenas hidróxido de sódio, sendo possível realizar o desmolde em 1 dia de cura, enquanto as demais composições foram desmoldadas com 2 dias de curas. Essas observações também foram verificadas por Provis et al. [73], entretanto, a ausência de composições com diferentes quantidades de silicato de sódio (razões de

hidróxido de sódio e silicato de sódio) impossibilitou uma análise mais conclusiva da influência do silicato na resistência mecânica do geopolímero.

Em relação a cristalinidade dos precursores empregados, observou-se o aumento da resistência à compressão com o uso de precursores com menores cristalinidade, o que reduz a quantidade de material de enchimento presente e aumenta a resistência conforme mencionado por Ozer e Uzun [67] e Santa [66]. Porém, conforme descrito anteriormente o aumento da resistência não é significativo e não deve ser considerado como fator diferencial entre as composições.

5.6.3.3 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

Uma vez que os resultados obtidos da análise de porosidade aparente dos corpos de prova demonstraram elevada porosidade para todas as composições, foi analisada pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio a distribuições e o tamanho relativo destes poros. A Figura 5.27 apresenta os resultados do ensaio.

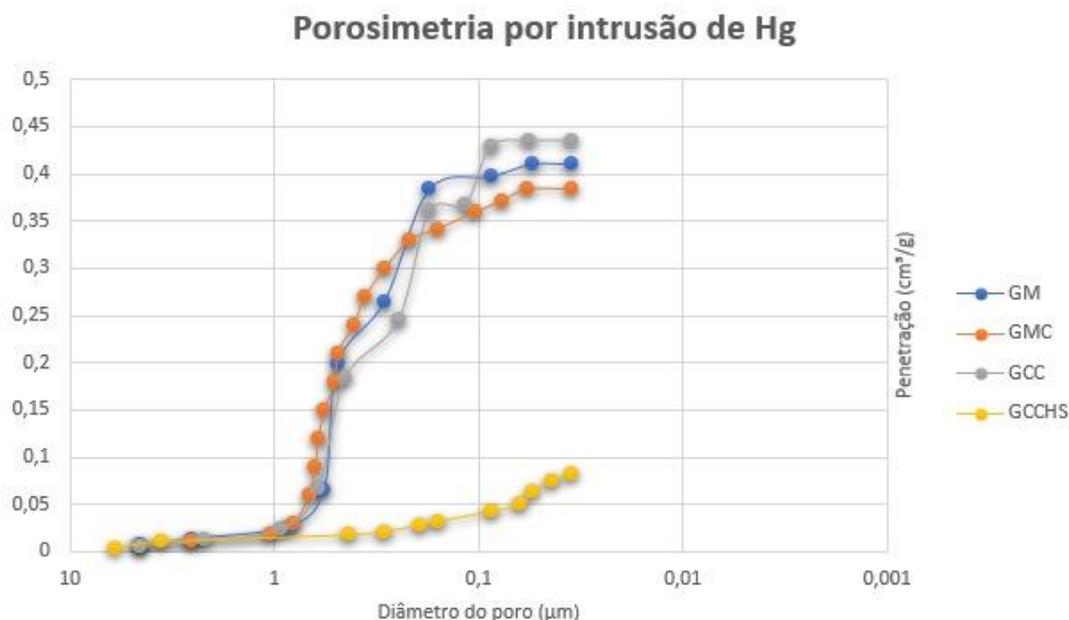


Figura 5.27 - Distribuição do tamanho dos poros obtidos por porosimetria de Hg para os corpos de geopolímeros [autoria própria].

De acordo com a Figura 5.27, pode ser observado que:

Para todas as composições, as matrizes geopoliméricas apresentaram 80% do tamanho dos poros inferiores a 4 μm , que são caracterizadas como poros pequenos [22], como também foi observado a similaridade das curvas de distribuição de tamanho dos poros das composições. Além disso, os resultados da porosidade aparente (Tabela 5.11) refletiu em maior penetração de volume de mercúrio quando comparado a penetração das matrizes geopoliméricas dos corpos de prova de concretos (Figura 5.8), exceto para a composição GCCHS que manteve penetração inferior as demais composições analisadas.

5.6.3.4 Caracterização microestrutural

Conforme realizado para os corpos de prova de concreto, foi realizada a análise da microestrutura do corpo de prova geopolimérico, isto é, somente matriz geopolimérica, por microscopia eletrônica de varredura. Para esta caracterização selecionou-se apenas a composição GCCHS, que enrijeceu mais rápido e diferenciou-se das demais composições.

A microestrutura do corpo de prova é apresentada na Figura 5.28 e Figura 5.29. Pode ser observado na micrografia da Figura 5.28 que a microestrutura não totalmente compactada e possui poros (P) grandes, profundos e isolados não detectados por porosimetria de HG, o que leva a perda de resistência à compressão. Além disso, a micrografia também apresenta pequenas partículas características de metacaulim (M) que não reagiram durante o processo de geopolimerização. Observações microestruturais similares foram reportadas por Rocha [94].

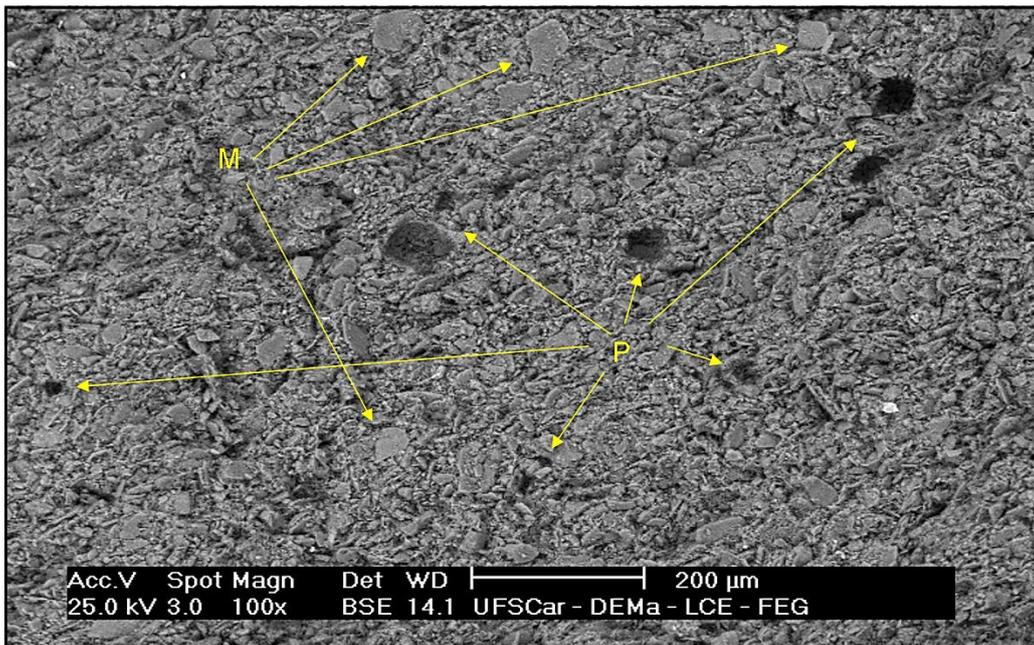


Figura 5.28 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura do corpo de prova de ligante geopolimérico a partir de caulim calcinado e solução ativadora de hidróxido de sódio e silicato de sódio (GCCHS) [autoria própria].

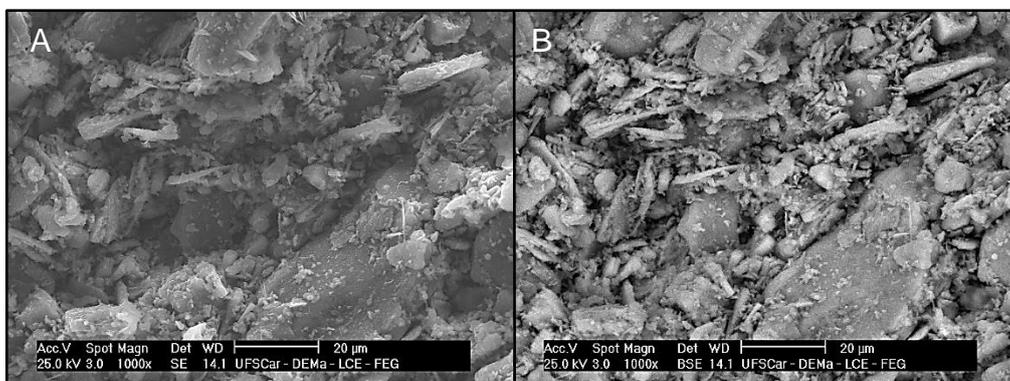


Figura 5.29 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura do corpo de prova de ligante geopolimérico a partir de caulim calcinado e solução ativadora de hidróxido de sódio e silicato de sódio (GCCHS): A) elétrons secundários e B) elétrons retroespalhados [autoria própria].

Na micrografia da Figura 5.29A pode-se observar que a matriz não apresentou bom adensamento (regiões vazias), fato que pode ser relacionado a não utilização de agregados, visto que ocorreu melhor adensamento da matriz

nas micrografias de concreto geopolimérico (CGB). Entretanto, a imagem obtida por elétrons retroespalhados (BSE), Figura 5.29B, não mostra partículas de sódio que não reagiram no processo de geopolimerização, conforme foram observadas nas microestruturas dos corpos de prova de de concreto com uso de metacaulim comercial (Figuras 5.11 e 5.14); nem tampouco foi observado o fenômeno de exsudação nessa composição.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, diferentes composições de concretos preparados a partir de materiais tradicionais e alternativos foram analisadas visando a aplicação em pavimentos intertravados. Para as condições experimentais adotadas pode se chegar a algumas conclusões.

Os resultados apresentados referente as composições de cimento Portland demonstraram parcialmente potencial na aplicação de pavimentos intertravados. Entre as composições analisadas para este ligante cimentício o CPB que utilizou o agregado graúdo convencional (brita) atendeu as exigências mínimas estabelecido pela ABNT NBR 9781:2013, entretanto, há a necessidade de melhorias na dosagem ou no processo de conformação das peças para viabilidade das composições que utilizaram RCC como agregado graúdo, visto que essas composições não atenderam a resistência à compressão mínima e a absorção de água estabelecido pela norma.

Por meio de análises comparativas da forma em que o agregado RCC é utilizado, foi confirmado que o RCC previamente umedecido gera contribuições significativas na resistência à compressão final, uma vez que, os poros presentes no RCC cheios dificultam a capacidade de absorver mais água que está disponível para a hidratação do cimento Portland. Além disso, composições com RCC umedecido melhoram a trabalhabilidade do concreto, facilitam o processo de conformação e evitam falhas de preenchimentos que podem comprometerem com a resistência.

O uso de ligante geopolimérico como substituto ao cimento Portland na aplicação de pavimentos intertravados não demonstrou potencial. A reprodução das condições e proporções utilizadas no preparo do concreto de cimento Portland para o de ligante geopolimérico gerou algumas dificuldades, principalmente na etapa de mistura entre o precursor com o ativador alcalino, sendo necessário a adição de água para a obtenção da mistura completa dos materiais e homogeneização. Além disso, o metacaulim empregado no estudo (comercializado pela Metacaulim do Brasil) não contém características de metacaulim, visto que após os corpos de prova com diferentes agregados brita

e RCC (CGB e CGRCC) apresentaram baixíssimas resistências, 0,4 MPA e 0,57 Mpa, respectivamente. Após investigação das possíveis causas, pode-se inferir por meio de um novo tratamento térmico do precursor e de uma análise de difração de raios X, que tanto o processo de calcinação e a matéria-prima utilizada pela empresa não são adequados, resultando em material com elevada cristalinidade.

A cristalinidade do material precursor exerce grande influência na resistência mecânica dos geopolímeros. A relação entre baixa resistência à compressão com a alta cristalinidade foi confirmada por análises comparativas de corpos de provas moldados com geopolímeros preparados a partir de metacaulins com diferentes cristalinidades. Porém, os resultados mantiveram-se com baixa resistência, visto que a cristalinidade dos precursores testados ainda era elevada.

Em relação ao ativador alcalino empregado no preparo dos geopolímeros, não foi possível confirmar que o uso de hidróxido de sódio em conjunto ao silicato de sódio resulta no aumento de resistência à compressão, já que a cristalinidade do precursor utilizado ainda era alta e levou a valores de resistência próximos das demais composições que utilizaram apenas hidróxido de sódio como ativador. Entretanto, confirmou-se que o uso de silicato de sódio em conjunto ao hidróxido de sódio resulta em enrijecimento mais rápido dos corpos de prova.

Portanto, concluiu-se que embora a literatura mencione os geopolímeros como ligante em potencial para substituição do cimento Portland, este ligante ainda necessita de estudos para padronizações e simplificações de processamento, uma vez que pode utilizar diferentes matérias-primas com potencial de aplicação no preparo das composições precursoras, bem como dos ativadores.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização deste estudo, observou alguns pontos que merecem melhor investigação. Entre eles destacam-se:

- Avaliar para as composições de concreto a partir de cimento Portland e RCC se o método de conformação por peças prensadas contribui com os requisitos mínimos estabelecidos por norma para a aplicação em pavimentos intertravados.
- Avaliar a eficácia de outras dosagens de concreto utilizando RCC como agregado graúdo na aplicação de pavimentos intertravados e, posteriormente, a viabilidade utilizando o ligante geopolimérico em substituição ao cimento Portland.
- Avaliar o comportamento de ativadores alcalinos a partir de hidróxido de potássio e silicato de potássio no aumento de resistência à compressão e melhoria na microestrutura dos geopolímeros.
- Avaliar o comportamento de outros precursores geopoliméricos que apresentam menores cristalinidades e verificar a viabilidade para aplicação de pavimentos intertravados.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COSTA, E. B. da.; NOBRE, T. R. S.; GUERREIRO, A. Q.; MANCIO, M.; KIRCHHEUM, A. P. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 75-86, 2013.
- [2] ECYCLE. **Clínquer: O que é, impactos ambientais e alternativas**. [s.a]. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br>. Acesso em 22 jan. 2021.
- [3] ABRECON. **Brasileiro produz por ano meia tonelada de resíduos de construção civil**. 2011. Disponível em: <https://abrecon.org.br>. Acesso em: 22 de jan. 2021.
- [4] TURNER, L. K.; COLLINS, F. G. Carbon dioxide equivalente (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 125-130, jun. 2013.
- [5] KHALE, D.; CHAUDHARY, R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of Materials Science**, v. 42, p. 729-746, fev. 2007.
- [6] BOHNENBERGER, J. C.; PIMENTA, J. F. de P.; ABREU, M. V. S.; COMINI, U. B.; CALIJURI, M. L.; MORAES, A. P.de; PEREIRA, I. da S. Identificação de áreas para implantação de usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição com uso de análise multicritério. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 299-311, 2018.
- [7] TECNOSIL. **Pavimento intertravado: Por que ele pode ser uma ótima solução para a sua construção**. [s.a]. Disponível em: <https://tecnosilbr.com.br>. Acesso em:18 jan. 2021.
- [8] FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

[9] KNAPTON, J. The Romans and their roads: the original small element pavement technologists. In: INTERNATIONAL CONCRETE BLOCK PAVING CONFERENCE, 5., jun. 1996, Tel-Aviv, Israel. **Proceedings...** Tel-Aviv, Israel, 1996. p. 17-52.

[10] SIMIELE, D. **Aproveitamento de Resíduos de Concreto na Confecção de Peças para Pavimento Intertravado de Concreto**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

[11] MULLER, R. M. **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

[12] CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto: Estudo dos elementos e métodos de dimensionamento**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de pavimento intertravado: Passeio Público**. São Paulo, 2010.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

[15] BITTENCOURT, S. F. **Avaliação da resistência à compressão de pavers produzido com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição**. 2012. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2012.

[16] PIROLA, F. C. **Contribuição para o estudo de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação de 50MPa**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Uma breve história do cimento Portland**, 2009. Disponível em: <https://abcp.org.br>. Acesso em: 21 jan. 2021.
- [18] MAUÁ. **Como é feito o cimento, sua composição e nomenclatura no mercado**. 2017. Disponível em: <https://cimentomaua.com.br>. Acesso em: 21 jan. 2021.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Cimento: Diferentes tipos e aplicações**. 2018. Disponível em: <https://abcp.org.br>. Acesso em: 21 jan. 2021.
- [20] Cimento Itambé. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br>>. Acesso em 13 nov. 2021.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: Agregados – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.
- [22] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- [23] SBRIGHI NETO, C. Agregados naturais, britados e artificiais para concreto. In: **Concreto: ciência e tecnologia**. Cap. 3. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Editor Geraldo C. Isaia, v. 1, p. 233-260
- [24] PORTO, M. E. H. C.; SILVA, S. V. Reaproveitamento dos entulhos de concreto na construção de casas populares. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **ENEGEP**. Rio de Janeiro, RJ. 13-16, out. 2008.
- [25] ÂNGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto com agregados reciclados. **Concreto: ciência e tecnologia**. v.2, n.1, p.1731-1767, 2011.
- [26] Lima, J. A. R. **Proposição de Diretrizes para Produção e Normalização de Resíduo de Construção Reciclado e de suas Aplicações em Argamassas e Concretos**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

[27] Leite, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

[28] NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p. Tradução: Ruy Alberto Cremonesi.

[29] CABRAL, A. E. B. **Modelagem de Propriedades Mecânicas e de Durabilidade de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados, Considerando-se a Variabilidade da Composição do RCD**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007.

[30] STROHER, A. P.; KATO, D. S.; YAMAGUCHI, N. A.; JUNIOR, O. M. C. Utilização de cerâmica de entulho na substituição de agregado graúdo do concreto. **Cerâmica Industrial**, v. 22, n. 4, 2017.

[31] FILHO, A. V.; BONILHA, F. R.; BELLINASSO, C. A. Uma análise de substituição de agregado graúdo por blocos cerâmicos residuais na elaboração do concreto. 9º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão. **SIEPE**. Santana do Livramento, RS. 21-23 nov, 2017.

[32] SANTOS, C. J. R.; LIMA, D. A.; JUNIOR, E. R. S.; BATISTA, L. S.; FERREIRA, M. L. M. Estudo do comportamento mecânico do concreto a partir da utilização de RCD como agregado graúdo. 1º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. **CONRESOL**. Gramado, RS. 12-14 jun, 2018.

[33] GEO-POL CIMENTO GEOPOLIMÉRICO. **Origem do cimento geopolimérico**. [s.a]. Disponível em: <http://www.geopolymer.com.br>. Acesso em: 11 jan. 2021.

[34] CERÂMICA ROQUE. **Soluções inovadoras em geopolímeros**. [s.a]. Disponível em: <https://www.ceramicaroque.com.br/web/solucoes-inovadoras-em-geopolimeros>. Acesso em 11 jan. 2021.

- [35] KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals Engineering**, v. 20, n. 14, p 1261-1277, nov. 2007.
- [36] MAJIDI, B. Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review. **Materials Technology**, v. 24, n. 2, p. 79-87, jul. 2009.
- [37] SEVERO, C. G. S.; COSTA, D. L.; BEZERRA, I. M. T.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente, **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 8, n. 2, p. 55-67, 2013.
- [38] SNELLINGS, R.; MERTENS, G.; ELSEN, J. Supplementary cementitious materials. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 74, n. 1, p. 211-278, 2012.
- [39] PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. **Annual Review of Materials Research**, v.44, p.299-327, jul. 2014.
- [40] DAVIDOVITS, J. Geopolymers and Geopolymeric materials. **Journal of Thermal Analysis**, v.35, n. 2, p. 429-441, mar. 1989.
- [41] DAVIDOVITS, J. Ancient and Modern Concretes: What is the Real Differenc. **Concrete International**, v. 9, n. 12, p. 23-35, 1987
- [42] BUCHWALD, A.; DOMBROWSKI, K.; WEIL, M. Development of Geopolymer Concrete Supported by System Analytical. 2nd International Symposium: **Non-Tradition Cement and Concrete**. Brno, Czech Republic, p. 25-35, jun. 2005.
- [43] DAVIDOVITS, J. Properties of Geopolymer Cements. **Alkaline Cements and Concretes**, p. 131-149, 1994.
- [44] SILVA, F. J. **Reforço e Fratura em Compósitos de Matriz Álcali-ativada**. 2000. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2000.

[45] DAVIDOVITS, J. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. Geopolymer 2002 conference, v. 28, p. 29, 2002.

[46] GLUKHOVSKY, V. D. Soil Silicates. **Gosstroyizdat Ukrainy Publishing**, p. 154, 1959.

[47] DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymer Technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917-2933, 2007.

[48] FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PALOMO, A. Alkali activation of fly ashes: Mechanisms of reaction. 2nd International Symposium. **Non-Traditional Cement and Concrete**. Brno, Czech Republic, p. 13-24, jun. 2005.

[49] FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PALOMO, A. A mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 86, p. 207-214, nov. 2005.

[50] FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PALOMO, A.; SOBRADOS, I.; SANZ, J. The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 91, p. 111-119, abr. 2006.

[51] PALOMO, A.; ALONSO, S.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; SOBRADOS, I.; SANZ, J. Alkaline Activation of Fly Ashes: NMR Study of the Reaction Products. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 87, n. 6, p. 1141-1145, 2004.

[52] LONGHI, M. A. **Álcali-Ativação de Lodo de Caulim Calcinado E Cinza Pesada Com Ativadores Convencionais E Silicato de Sódio Alternativo**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

[53] SANTA, R. A. A. B. **DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS A PARTIR DE CINZAS PESADAS ORIUNDAS DA QUEIMA DO CARVÃO MINERAL E METACAULIM SINTETIZADO A PARTIR DE RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE**

PAPEL. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

[54] CESARI, V.F. **Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

[55] ZHANG, M.; ZHAO, M.; ZHANG, G.; MANN, D.; LUMSDEN, K.; TAO, M. Durability of red mud-fly ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 372-382, out. 2016.

[56] ZEGHICHI, L. The effect of replacement of natural aggregates by slag products on the strength of concrete. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 7, n. 1, p. 27-35, 2006.

[57] ÖZBAY, E.; ERDEMIR, M.; DURMUS, H. I. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 423- 434, fev. 2016.

[58] POON, C. -S.; LAM, L.; KOU, S. C.; WONG, Y. -L.; WONG, R. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 9, p. 1301-1306, ago. 2001.

[59] JOHN, V. M.; NITA, C. Materiais Pozolânicos: O metacaulim e a sílica ativa. **Boletim técnico da Escola Politécnica USP**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/451, 2007.

[60] SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, p. 441-454, nov. 2001.

[61] SHVARZMAN, A.; KOVLER, K.; GRADER, G. S.; SHTER, G. E. The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite. **Cement and Concrete Research**, v. 13, n. 3, p. 405-416, mar. 2003.

[62] SPERINCK, S.; RAITERI, P.; MARKS, N.; WRIGHT, K. Dehydroxylation of kaolinite to metakaolin-a molecular dynamics study. **Journal of Materials Chemistry**, v. 21, n. 7, p. 2118-2125, fev. 2011.

[63] BARATA, M. S.; ANGÉLICA, R.S. Atividade pozolânica dos resíduos caulíníficos das indústrias de mineração de caulim da Amazônia. **Revista Matéria**, v. 16, n. 3, p. 797-810, 2011.

[64] WALTERS, G. V.; JONES, T. R. Effect of metakaolin on álcali-silica reaction (ASR) in concrete manufactured with reactive aggregate. In: **Durability of Concrete**. Second International Conference. Montreal, Canada. 4-9 august, 1991.

[65] SOUZA, P. S. L. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

[66] SANTA, R. A. A. B. **Síntese de geopolímeros a partir de cinzas pesadas e metacaulim para avaliação das propriedades de solidificação/imobilização de resíduos tóxicos**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

[67] OZER, I.; SOYER-UZUN, S. Relations between the structural characteristics and compressive strength in metakaolin based geopolymers with diferente molar Si/Al ratios. **Ceramics International**, v. 41, n. 8, p. 10192-10198, 2015.

[68] DING, J. T.; LI, Z. Effects of metakaolin and sílica fume on properties of concrete. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 4, p. 393-398, 2002.

[69] SIDDIQUE, R.; KLAUS, J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**, v. 43, p. 392-400, 2009.

[70] FIGUEIREDO, C. P.; SANTOS, F. B.; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CACHIM, P.; VELOSA, A. The role of metakaolin in the protection of concrete

against the deleterious action of chlorides. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 4, p. 685-708, ago. 2014.

[71] BARBHUIYA, S.; CHOW, P. L.; MEMON, S. Microstructure, hydration and nanomechanical properties of concrete containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 696-702, jul. 2015.

[72] PETERMANN, J. C.; SAEED, A.; HAMMOND, M. I. Alkali-Activated Geopolymers: a literature review. **Air Force Research Laboratory Materials and Manufacturing Directorate**, ed: Applied Research Associates Inc Panama City Fl, 2010.

[73] PROVIS, J. L.; LUKEY, GRANT. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results. **Chemistry of Materials**, v. 17, n. 12, p. 3075-3085, 2015.

[74] KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals Engineering**, v. 20, p. 1261-1277, 2007.

[75] YUN-MING, L.; CHENG-YONG, H.; AL BAKRI, M. M.; HUSSIN, K. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. **Progress in Materials Science**, v. 83, p. 595-629, out. 2016.

[76] ZHANG, F.; ZHANG, L.; LIU, M.; MU, C.; LIANG, Y. N.; HU, X. Role of alkali cation in compressive strength of metakaolin based geopolymers. **Ceramics International**, v. 43, n. 4, p. 3811-3817, mar. 2017.

[77] EDUOK, E. I. **Thermal properties of geopolymer materials**. 2016. Dissertação (Mestrado em Física) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade de Stavanger, Stavanger, 2016.

[78] HOUNSI, A.D.; LECOMTE-NANA, G.; DJÉTÉLI, G.; BLANCHART, P.; ALOWANOU, D. KPELOU, P.; NAPO, K.; TCHANGBÉDJI, G.; PRAISLER, M. How does Na, K alkali metal concentration change the early age structural characteristic of kaolin-based geopolymers. **Ceramics International**, v. 40, n. 7, p. 8953–8962, ago. 2014.

- [79] GHARZOUNI, A.; SOBRADOS, I.; JOUSSEIN, E.; BAKLOUTI, S.; ROSSIGNOL, S. Predictive tools to control the structure and the properties of metakaolin based geopolymer materials. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 511, p. 212-221, nov. 2016.
- [80] KEN, P. W.; R, M.; BAN, C. C. An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 370-395, 2015.
- [81] De SILVA, P.; SAGOE-CRENSTIL, K.; SIRIVIVATNANON, V. Kinetics of geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 4, p. 512-518, abr. 2007.
- [82] LONGHI, M. A. **Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- [83] DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Applications**. 5. ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2020.
- [84] NAZARI, A.; SANJAYAN, J. **Handbook of Low Carbon Concrete**. 1. ed. Kidlington: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [85] MEHTA, A.; SIDDIQUE, R. An overview of geopolymers derived from industrial by-products. **Construction and Building Materials**, v. 127, p 183-198, nov. 2016.
- [86] FAWER, M.; CONCANNON, M.; RIEBER, W. Life Cycle Inventories for the Production of sodium silicates. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 4, p. 207-212, jul. 1999.
- [87] BORGES, P. H. R.; LOURENÇO, T. M. F.; FOUREAUX, A. F. S.; PACHECO, L. S. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, v. 14, n. 2, p. 153-168, jun. 2014.

- [88] GEOPOLYMER INSTITUTE. **Alkaline Cements and Concretes, Properties of Geopolymer cements**. 2006. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/>. Acesso em 13 jan. 2021.
- [89] GEO-POL CIMENTO GEOPOLIMÉRICO. **Cimento GP**. 2009. Disponível em: <http://www.geopolymer.com.br>. Acesso em 13 jan. 2021.
- [90] GEOPOLYMER INSTITUTE. **70,000 tonnes Geopolymer Concrete for airport**. 2014. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/>. Acesso em 14 jan. 2021.
- [91] VAZ, A. D.; D`SOUZA, D. N.; KALIVEER, N.; SATISH, K. T.; AMAR, S. M. Geopolymer Paver Blocks. **Proceeding of International Conference on Advances in Civil Engineering**, p. 173-178, 2012.
- [92] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- [93] Laboratório de Caracterização Estrutural. Disponível em: <<https://www.lce-dema.ufscar.br>>. Acesso em 20 out. 2021.
- [94] ROCHA, T. S. **Argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores alcalinos e seus comportamentos frente à elevação da temperatura**. 2017. Dissertação – (Mestrado em engenharia civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2017.
- [95] DIAS, C. M. R. Efeitos do envelhecimento na microestrutura e no comportamento mecânico dos fobrocimentos. 2005. Tese – (Doutorado em engenharia civil) – Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2005.
- [96] AZEVEDO, A. G. S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T. Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 64, n. 371, p. 388-396, 2018.