

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA

LUCAS EDUARDO DE ARAUJO

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS COM O USO DE
RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Joinville

2017

LUCAS EDUARDO DE ARAUJO

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS COM O USO DE
RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Infraestrutura, no curso de Engenharia de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Senff
Coorientadora: Andreia De Rossi

Joinville

2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Dr. Luciano Senff pela excelente orientação durante todo este trabalho, estando sempre presente para ajudar. Também pelas oportunidades de desenvolvermos outros projetos e trabalhos juntos.

À minha coorientadora Andreia de Rossi pela atenção e ajuda durante as etapas dos trabalhos laboratoriais.

À Faculdade Católica de Joinville por ter disponibilizado espaço e equipamentos para os ensaios de resistência mecânica.

Aos meus pais e irmão, por todo apoio durante esta importante etapa da minha vida.

À minha namorada Nathalia, por estar presente em todos os momentos e me motivar a dar o meu melhor.

“A menos que modifiquemos nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

Albert Einstein

RESUMO

O material mais utilizado pela construção civil é o cimento Portland e infelizmente sua produção está ligada a alta emissão de CO₂ na natureza. A indústria da construção civil busca desenvolver alternativas mais sustentáveis a esse material com novas tecnologias. O cimento geopolimérico vem sendo estudado nesses últimos anos, visto que sua produção garante uma redução dessas emissões no meio ambiente, sendo caracterizado pela ativação de uma matriz inorgânica (fonte de alumínio e sílica) com uma solução alcalina. Seguindo pelo caminho da sustentabilidade, pesquisas buscam uma aplicação para os resíduos de construção e demolição (RCD) que muitas vezes são descartados de forma incorreta. Nesta pesquisa o metacaulim e a cinza de casca de arroz foram utilizados como fonte de alumina e sílica, enquanto o hidróxido de sódio (NaOH) e o silicato de sódio foram utilizados como solução ativadora. Para produção das argamassas geopoliméricas, foi mantida uma solução com concentração de 10 mols/l e uma relação sólido/líquido variando de 1,60 a 1,15. O metacaulim foi substituído parcialmente pela cinza de casca de arroz em 15% para todas as amostras. Toda a parte líquida das formulações provém da solução ativadora, sendo 65% hidróxido de sódio (NaOH) e 35% silicato de sódio. Substituiu-se a areia por RCD nas proporções de 25, 50, 75 e 100% e comparou-se com a formulação de referência contendo apenas areia. Foram analisadas as propriedades físicas (absorção de água, densidade e porosidade aparente) e a resistência mecânica a flexão e compressão. Os resultados demonstram que a resistência à compressão das formulações 0% RCD e 100% RCD alcançaram 22,79 e 11,55 MPa respectivamente, enquanto a porosidade e absorção de água da segunda aumentaram em relação a formulação referência (0% RCD). Dessa forma, mostrou-se que é possível maximizar a aplicação do RCD em argamassas geopoliméricas.

Palavras-chave: Geopolímeros. Argamassa. Metacaulim. Cinza de casca de arroz. Resíduo de construção e demolição. Sustentabilidade.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivos	10
1.1.1	Objetivo Geral	10
1.1.2	Objetivos específicos	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Geopolímeros	12
2.1.1	Fontes de Aluminossilicatos: Metacaulim e Cinza de Casca de Arroz	13
2.1.2	Ativadores: Hidróxido de sódio e Silicato de Sódio	14
2.1.3	Aplicações na Construção Civil	15
2.2	Resíduo de Construção e Demolição (RCD)	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1	Materiais	21
3.1.1	Metacaulim (MK) e Cinza de Casca de Arroz (CCA)	22
3.1.2	Hidróxido de Sódio (NaOH) e Silicato de Sódio (Na ₂ SiO ₃)	24
3.1.3	Areia e Resíduo de Construção e Demolição (RCD)	25
3.2	Metodologia Experimental	27
3.2.1	Definição das Formulações e Produção das Amostras	29
3.2.2	Ensaio no Estado Fresco	31
3.2.3	Ensaio no Estado Endurecido	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Ensaio no Estado Fresco	35
4.2	Propriedades Físicas: Absorção de Água, Densidade e Porosidade	
	Aparente	36
4.3	Resistência à Flexão e Compressão	39
4.4	Relações Entre Propriedades Físicas e Mecânicas	41
5	CONCLUSÃO	44
5.1	Sugestão para Trabalhos Futuros	45
	REFERÊNCIAS	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Artefatos geopoliméricos: a) espuma geopolimérica; b) tijolo maciço; c) blocos vazados; d) blocos maciços.	16
Figura 2 - Aplicações dos geopolímeros segundo sua estrutura molecular.	17
Figura 3 - Aeroporto Brisbane West Wellcamp (Austrália).	18
Figura 4 – Impacto dos Resíduos de Construção e Demolição no meio ambiente. ...	19
Figura 5 – Descarte incorreto dos Resíduos de Construção e Demolição.	19
Figura 6 - Matérias primas utilizadas para produção da argamassa geopolimérica: a) MK, b) CCA, c) Silicato de sódio, d) RCD, e) Areia, f) Solução NaOH 10 molar.	22
Figura 7 – Determinação do tamanho da partícula do Metacaulim.	23
Figura 8 – Difração de raios-X do Metacaulim.	23
Figura 9 - a) Curvas Granulométrica da Cinza de Casca de Arroz b) Difração de raio-X da Cinza de Casca de Arroz.	24
Figura 10 –Empresa Vitaciclo S.A., fornecedora do RCD.	25
Figura 11 – Composição Granulométrica: a) Areia; b) RCD.....	26
Figura 12 - Resíduo de construção e demolição: a) fornecido pela empresa Vitaciclo, b) RCD passante na peneira 2,36mm.	26
Figura 13 – a) Ensaio de difração de raio-X.....	27
Figura 14 - Plano experimental do trabalho.	28
Figura 15 - Fluxograma do procedimento para produção dos corpos de prova.	31
Figura 16 – Equipamentos utilizados para produção da argamassa geopolimérica: a) Espátulas e moldes, b) Misturador mecânico, c) Mesa de adensamento com contador de golpes.	31
Figura 17 – Equipamentos para ensaio na mesa de consistência: a) Mesa de consistência, b) Moldagem do corpo de prova, c) Abertura da formulação de referência.	32
Figura 18 – Equipamentos utilizados no presente trabalho de pesquisa: a) Estufa, b) Máquina para ensaios mecânicos.	33
Figura 19 - Corpos de prova em argamassa geopolimérica para ensaios físicos e mecânicos.	33

Figura 20 – a) Medição em massa da amostra imersa, b) Medição em massa da amostra saturada com superfície seca, c) Imersão dos corpos em água.	34
Figura 21 – Ensaio na mesa de consistência para determinação da quantidade de água nas formulações: a) Formulação referência (0% RCD), b) Formulação 100% RCD.	35
Figura 22 – Resultado médio do espalhamento na mesa de consistência das argamassas geopoliméricas.	36
Figura 23 – Propriedades físicas das argamassas geopoliméricas com 28 dias: a) Absorção de água, b) Porosidade aparente, c) Densidade aparente.	37
Figura 24 - Relação entre as propriedades físicas das argamassas geopoliméricas: a) Porosidade aparente vs Absorção de água, b) Porosidade vs Densidade aparente.	38
Figura 25 - Resistência mecânica da argamassa geopolimérica com 28 dias de cura: a) Compressão, b) Flexão.	40
Figura 26 – Relação da resistência mecânica com as propriedades físicas das argamassas geopoliméricas: a) Resistência à compressão vs Porosidade aparente, b) Resistência à compressão vs Densidade aparente.	41
Figura 27 - Relação da resistência mecânica com as propriedades físicas das argamassas geopoliméricas: a) Resistência à flexão vs Porosidade aparente, b) Resistência à flexão vs Densidade aparente.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Razões ideais para formulação dos Geopolímeros.....	15
Tabela 2 – Composição química do Metacaulim determinado por FRX.....	23
Tabela 3 - Composição química da CCA determinada por FRX.	23
Tabela 4 – Especificações do hidróxido de sódio.....	24
Tabela 5 – Especificações do silicato de sódio.	25
Tabela 6 - Formulação das amostras, em massa, para produção dos corpos de prova.	29
Tabela 7 – Relações obtidas das formulações de argamassa geopolimérica.	30

1 INTRODUÇÃO

Com os fortes impactos que a construção civil causa no meio ambiente, estudos inovadores de indústrias e do meio científico buscam alternativas para obter uma tecnologia mais sustentável.

A indústria do cimento brasileira continua se posicionando internacionalmente, ano após ano, como a mais eficiente no controle das suas emissões de gases de efeito estufa. O nível de excelência alcançado vem de vários esforços e estratégias implementadas ao longo das últimas décadas (SNIC, 2013, p. 10).

O cimento Portland é o principal material dos concretos e argamassas e o mais utilizado na construção civil. Ele é responsável por dar resistência mecânica elevada à mistura, bem como uma boa durabilidade (BORGES et al., 2014).

No ano de 2013 foram consumidas 71 milhões de toneladas de cimento em território nacional, o que significa um consumo per capita de 353 kg/hab.ano (SNIC, 2013).

Esse grande consumo do cimento Portland gera uma preocupação, visto que em seu processo produtivo, a etapa denominada clínquerização, onde ocorre a queima de argila e calcário, necessita de uma temperatura de aproximadamente 1500°C, que gera alta liberação de CO₂. Em outra parcela, a temperatura no forno para queima de combustíveis pode chegar a 2000°C (SINDICATO..., 2011). Para cada tonelada de cimento Portland produzido, cerca de 0,95 toneladas de CO₂ são emitidos, o que torna a produção do material agressiva ao meio ambiente.

É um grande desafio para o mundo encontrar novas tecnologias e meios para desenvolver materiais mais sustentáveis que atendam as características necessárias dos materiais que são utilizados hoje.

Estudos que iniciaram nas décadas de 1940-50 pelos pesquisadores Glukhovsky e Krivenko e que seguem até hoje, apontam a substituição do cimento Portland por materiais obtidos na reação alcalina de aluminossilicatos, que são denominados geopolímeros (KRIVENKO, 2008 apud BORGES, 2014). Esses

materiais possuem propriedades interessantes no ponto de vista mecânico, econômico e sustentável.

Assim como os materiais alternativos, outra grande tendência crescente no meio científico são as adições de resíduos de construção civil em argamassas. A utilização dos RCD em substituição a areia pode ser muito interessante e ajuda de fato a minimizar os impactos ambientais relacionados a eliminação incorreta. Para a sua aplicação, é necessário um estudo peculiar referente ao tamanho das partículas, homogeneidade e composição química, o que interfere diretamente na trabalhabilidade, porosidade, coloração, resistência mecânica, densidade, absorção de água, entre outros.

Diante disso e com base nas vantagens que o uso de geopolímeros apresentam em relação ao cimento Portland e os benefícios que a utilização de resíduos traz ao lado econômico e sustentável, esta pesquisa concentra-se em analisar experimentalmente, através de corpos de prova, os parâmetros físicos e mecânicos de uma argamassa geopolimérica, desenvolvida a partir do uso de metacaulim e cinza de casca de arroz com substituição em proporções distintas da areia pelo RCD.

Os teores de resíduos serão definidos com base na mesa de consistência e a partir dos resultados serão produzidas 5 formulações. Os ensaios serão realizados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável (LabiCons) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus de Joinville, no Laboratório de Resistência dos Materiais do Centro Universitário Católica de Santa Catarina – Joinville e no Núcleo de Pesquisa em Materiais Cerâmicos e Compósitos do Laboratório (CERMAT) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC de Florianópolis, sendo eles: propriedades físicas (absorção de água, densidade e porosidade aparente) e a resistência mecânica a flexão e compressão.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma argamassa geopolimérica a partir do uso de metacaulim e cinza de casca de arroz com substituição em teores distintos da areia pelo resíduo de construção e demolição (RCD).

1.1.2 Objetivos específicos

- Produzir formulações em argamassas geopoliméricas, variando a quantidade de RCD;
- Determinar a relação sólido/líquido para os diferentes teores de resíduo de construção e demolição com base nos resultados da mesa de consistência (*flow table test*);
- Produzir corpos de prova para ensaios físicos e mecânicos;
- Avaliar o comportamento mecânico a partir das propriedades mecânicas (resistência a compressão e flexão) com 28 dias de cura;
- Avaliar as propriedades físicas (absorção de água, densidade e porosidade aparente) com 28 dias de cura.

O trabalho está composto em cinco capítulos. O primeiro capítulo, já apresentado, aborda a introdução e objetivos da pesquisa. O segundo trata da fundamentação teórica sobre geopolímeros, os materiais utilizados para sua produção e as aplicações na construção civil. No terceiro é descrito informações a respeito das matérias primas utilizadas bem como o detalhamento dos ensaios propostos para o trabalho. No quarto capítulo é apresentado uma análise dos resultados obtidos. E por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Geopolímeros

Os geopolímeros podem ser definidos como um novo cimento. Eles são produzidos através de uma ativação alcalina de sólidos contendo alumínio e sílica na forma amorfa ou semi-cristalina. A reação química é rápida e a cura inicial requer um período entre 24h e 48h.

O processo de geopolimerização é rápido, após ser processada a mistura entre o sólido, que é a fonte de aluminossilicato, e o ativador alcalino escolhido, em poucos segundos inicia-se a dissolução das partículas, reorganização e gelificação. O tempo de pega normalmente demora cerca de 90 minutos e, em aproximadamente 4 horas, a matriz sofre endurecimento (o tempo é variável dependendo da matéria-prima inicial e condições de processamento), não permitindo a formação de estrutura cristalina. (BOCA SANTA, 2012, p. 39).

Segundo Davidovits (1994), estudos químicos e mineralógicos mostram que as pirâmides do Egito não foram feitas com pedras calcárias naturais, mas com um composto de cálcio e hidróxido de sódio, produzidos pela mistura de cal, carbonato de sódio e água. Elas compreendem estruturas de amorfo a semi-cristalino e sua forma empírica está descrita na Equação 1, onde M é o elemento alcalino, n é o grau de polimerização e z pode ser 1, 2 ou 3.



De acordo com Borges (2014), o produto formado é considerado uma rocha sintética onde a estrutura contém uma rede tridimensional amorfa de átomos de silício e alumínio, cujas propriedades são influenciadas pela proporção Si/Al na microestrutura.

Em relação ao custo (m^3) quando comparado ao cimento convencional Portland, os concretos de base geopolimérica podem parecer mais caros (TORGAL et al., 2005). Esta diferença tem relação direta com o valor dos ativadores alcalinos,

que é mais da metade do custo total das misturas e eleva o custo final da matéria. Porém, se considerarmos as vantagens obtidas na resistência mecânica da mistura, os geopolímeros se tornam uma alternativa efetiva, visto que com maior resistência podemos reduzir a seção, o consumo de concreto e de aço.

Como dito anteriormente, para se produzir os geopolímeros é necessária uma fonte de alumina e sílica, e para isso pode-se utilizar o metacaulim e a cinza de casca de arroz.

2.1.1 Fontes de Aluminossilicatos: Metacaulim e Cinza de Casca de Arroz

Metacaulim precede do termo “meta”, que significa mudança e “caulim”, originado do termo chinês “Kauling”, ou “colina alta” que se refere a uma colina de Jauchau Fu, onde o material obtido é formado pela caulinita, apresentando cor branca ou quase branca devido ao baixo teor de ferro (SILVA, 1993, p. 1).

O metacaulim é a principal matéria prima para produção do geopolímero e sua composição influencia fortemente na qualidade do produto final. Esse material é produzido através de uma argila, denominada caulim, que é formada pela alteração de uma variedade de rochas amorfas e cristalinas. A caulinita é o principal argilomineral constituinte do caulim (MACCARINI, 2015).

O metacaulim possui em sua composição elementos essenciais para produção de geopolímeros, entre eles SiO_2 , cerca de 52%, e Al_2O_3 com aproximadamente 40%. Os outros 8% são considerados impurezas, e os elementos que as compõem são quartzo e outros argilominerais como o feldspato, a mica, gipsita, ferro e materiais orgânicos (NITA, 2006, p. 8).

O caulim é um minério argiloso obtido através do beneficiamento de argilas caulínicas, composto por silicatos de alumínio hidratados, tendo como um dos principais constituintes a caulinita (CASCAES, 2016). Após tratamento térmico, ocorre a transformação do caulim em metacaulim e o material se torna muito mais reativo contendo propriedades pozolânicas, ou seja, ele passa a ter composição silico-aluminosas e pode obter propriedades cimentícias através de uma ativação alcalina. Além disso, o produto obtido apresenta diferentes graus de finura, superfície específica e colorações variadas.

Resíduos, que hoje tem como destino aterros sanitários, podem ser usados como fonte de alumina e sílica, mas para isso precisam estar na forma amorfa ou semi-cristalina. No estudo realizado por Novais, fez-se o uso de lâmpadas

fluorescentes e os resultados apontaram aumento na resistência a compressão com substituição parcial do metacaulim pelo resíduo em questão. Tais resultados podem ser explicados pela relação Si/Al obtida (NOVAIS, 2016 apud HARTMANN, 2016).

A cinza de casca de arroz é um resíduo agroindustrial. Em sua composição podemos encontrar uma grande quantidade de sílica e alumina no estado amorfo ou semi-cristalino, ou seja, esse resíduo é uma fonte de aluminossilicatos ativos. Estudos apontam que de 15 a 25% de cinza de casca de arroz em substituição ao metacaulim apresentam relações ótimas. Para reação química do metacaulim e cinza de casca de arroz ocorrer é necessário um ativador alcalino (HARTMANN, 2016).

2.1.2 Ativadores: Hidróxido de sódio e Silicato de Sódio

As propriedades e a microestrutura dos geopolímeros estão relacionadas aos componentes químicos da matéria prima utilizada e dos ativadores alcalinos, que servem como uma reação de hidratação dos aluminossilicatos. A geopolimerização é um processo que ocorre em condições altamente alcalinas entre aluminossilicatos que passaram por um tratamento térmico. Estes líquidos podem ser a base de sódio ou potássio (BOCA SANTA, 2012).

“Na maioria das pesquisas, o hidróxido de sódio (NaOH) tem sido utilizado como parte da solução ativadora, em vez do hidróxido de potássio (KOH). De fato, o primeiro tem um custo de produção bem mais baixo, o que praticamente define sua escolha” (BORGES, 2014, p.157).

Segundo Boca Santa (2012), um dado muito relevante é a concentração a ser usada, a maioria dos autores defendem que seja entre 6-15 mols/l. A combinação de soluções é o que determina a força e o produto final dos geopolímeros e o uso de ativadores compostos são considerados mais eficientes.

Quando se combina NaOH (hidróxido de sódio) e Na_2SiO_3 (silicato de sódio), o material produzido se apresenta bem sólido, com poucos poros, existindo uma forte ligação entre a matriz geopolimérica e os agregados. Estudos realizados comprovam que o grau de reação em misturas utilizando o silicato de sódio + solução NaOH é maior, bem como a resistência mecânica obtida (BOCA SANTA, 2012). Isso ocorre devido ao fato de a sílica presente no silicato de sódio ser mais reativa do que a contida no metacaulim e cinza de casca de arroz.

Para definição a quantidade de cada material presente nas formulações, existem algumas relações encontradas na literatura que servem como parâmetros. Um estudo realizado por Duxson (2007) apresenta os limites para essas relações:

Tabela 1 – Razões ideais para formulação dos Geopolímeros.

Relação	Padrão
$\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$	3,3 -- 4,5
$\text{Na}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$	0,8 -- 1,6
$\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2$	0,2 -- 0,48
$\text{H}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O}$	10 -- 25

Fonte: Duxson (2007).

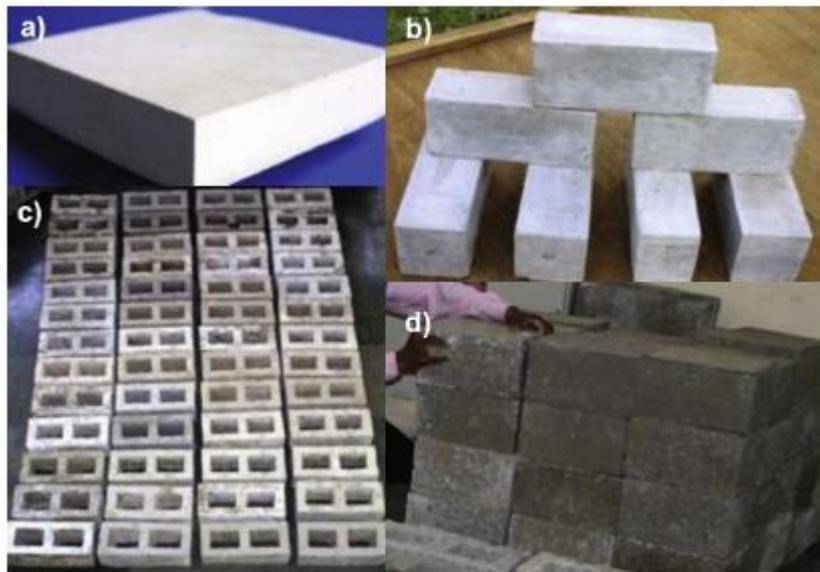
2.1.3 Aplicações na Construção Civil

Os materiais geopoliméricos apresentam um comportamento similar aos materiais à base de cimento. São produtos atrativos em termos de mercado, possuem baixo custo e menor agressão ao meio ambiente, sendo um material propício para substituir o cimento Portland, tendo uma diversidade para sua aplicação.

Os geopolímeros já possuem aplicação prática em diversas partes do mundo, sendo empregados como dormentes de ferrovias, blocos refratários, painéis pré-fabricados, reparações de rodovias e em obras de infraestrutura de pavimentação (GLASBY et al, 2015). Pode-se citar ainda outras finalidades para o uso dos geopolímeros como cimento para ambientes agressivos, reparos estruturais e contenção de resíduos tóxicos (CASCAES, 2016, p. 13).

A Figura 1 exemplifica diversos tipos de blocos que podem ser produzidos através dos geopolímeros.

Figura 1 - Artefatos geopoliméricos: a) espuma geopolimérica; b) tijolo maciço; c) blocos vazados; d) blocos maciços.

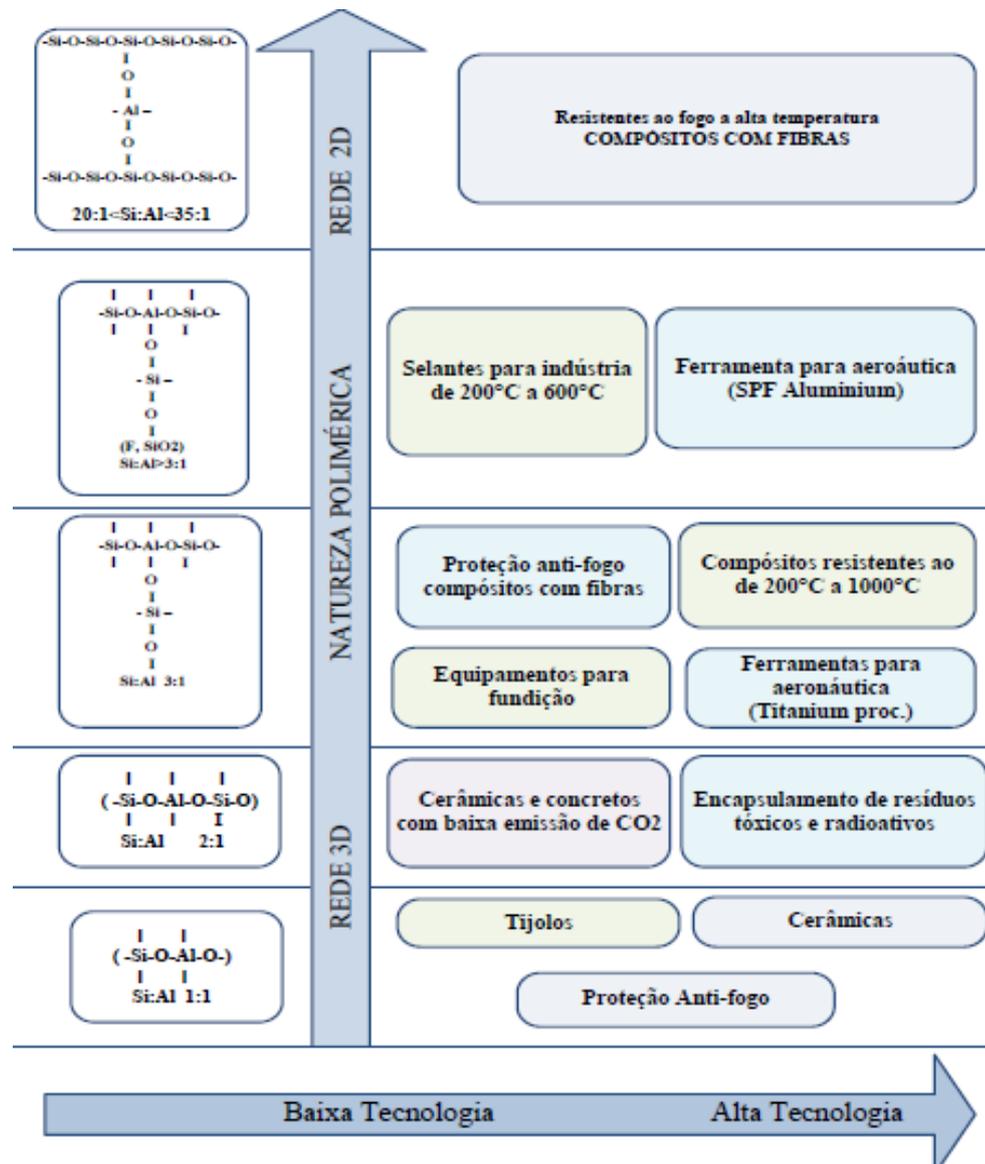


Fonte: SINGH et al. (2015).

Esses materiais têm grande potencial de aplicação, devido à sua alta resistência mecânica, resistência ao gelo e degelo, bem como um comportamento excelente frente ao fogo. Segundo Davidovits (2002), as aplicações desses materiais incluem a área da construção e pavimentação, artefatos de decoração, isolantes térmicos, materiais de fundição, itens refratários resistentes a choques térmicos, telhas de cerâmica, materiais compósitos para automóveis e aeronaves, sistemas de resinas de alta tecnologia e ainda barreira de proteção contra resíduos tóxicos e radioativos.

A Figura 2 produzida por Davidovits (2002) e adaptada por Boca Santa (2012) apresenta diversas aplicações que os geopolímeros podem assumir, segundo a sua estrutura química.

Figura 2 - Aplicações dos geopolímeros segundo sua estrutura molecular.



Fonte: Davidovits (2002) adaptado por Boca Santa (2012, p. 67).

O aeroporto de Brisbane (Figura 3) exemplifica o potencial de aplicação para esse tipo de material, ganhando o título de maior obra do mundo nesse segmento. Ao toda, foram consumidas 100 mil toneladas de concreto geopoliméricos no pavimento do pátio de manobras.

Figura 3 - Aeroporto Brisbane West Wellcamp (Austrália).



Fonte: The Chronicle 29 Sept. 2014

Muitos pesquisadores vêm estudando a diversidade de aplicação desses materiais, podendo ser usada em grande escala na construção civil, como em pontes, hidráulica, tratamento de resíduos, pavimentos e engenharia subterrânea. Sendo uma matéria abundante e tendo produção através de pozolanas ou aluminossilicatos de resíduos industriais, o material apresenta uma economia de energia e sustentabilidade ambiental, pois sua produção apresenta temperaturas entre 600° e 900°C, tendo baixa emissão de CO₂ (BOCA SANTA, 2012; CUNHA, 2013; DAVIDOVITS, 2002).

2.2 Resíduo de Construção e Demolição (RCD)

“Os geopolímeros fazem parte de uma classe de materiais com propriedades cimentícias, são materiais com grande potencial tecnológico por aceitarem em sua formulação matérias-primas naturais ou resíduos industriais de diversas fontes [...]” (BOCA SANTA, 2012, p.34).

No Brasil é gerado, em média, 520 kg/hab.ano de resíduos de construção e demolição (RCD). Isso representa 34 a 70% da massa total de resíduos sólidos urbanos produzidos nas cidades e que muitas vezes são descartados de forma incorreta (CABRAL, 2007). A Figura 4 exemplifica o descarte incorreto desses materiais e os impactos gerados no meio ambiente.

Figura 4 – Impacto dos Resíduos de Construção e Demolição no meio ambiente.



Fonte: www.sinticompi.com.br, 2017.

Dessa forma, é evidente a urgência de ações que visam diminuir a produção desses resíduos e uma dessas saídas é a reutilização desses materiais. Algumas pesquisas já apontam a utilização desses materiais em argamassas convencionais. Porém neste trabalho, busca-se aproveitar a grande aceitação que os geopolímeros oferecem frente a utilização de resíduos em sua matriz.

Figura 5 – Descarte incorreto dos Resíduos de Construção e Demolição.



Fonte: www.pensamentoverde.com.br, 2017.

Matias (2010) defende que a utilização de resíduos e a integração dos mesmos nas argamassas podem acarretar em vantagens técnicas e econômicas, sendo viável, sobretudo, no ponto de vista ambiental.

Também a superfície específica condiciona significativamente a reatividade pozolânica do material, pelo que, quanto maior a superfície específica das partículas, mais reativo este será. A quantidade de água, o condicionamento e o grau de compactação são também fatores que podem afetar a reatividade de pozolanas utilizadas em argamassas (MATIAS, 2010, p. 2).

Embora o RCD apresente uma quantidade significativa de sílica e alumina, os mesmos se encontram, quase que integralmente, na forma cristalina. Isso impossibilita a substituição desse material pelo metacaulim para reação e formação dos geopolímeros. Por isso, diferente da utilização da cinza de casca de arroz, uma das aplicações para o RCD é como agregado alternativo, em substituição parcial ou total a areia que compõe a argamassa, entrando como material inerte a reação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo serão apresentados os materiais, métodos e equipamentos utilizados para realização da pesquisa, bem como os ensaios empregados para caracterização das amostras nos estados fresco e endurecido.

3.1 Materiais

Por definição, argamassa tradicional é um material à base de Cimento Portland e/ou Cal, água e areia. Porém, para a execução deste trabalho de pesquisa empregou-se materiais aglomerantes mais sustentáveis, à base de geopolímeros:

- Metacaulim (MK) e cinza de casca de arroz (CCA) como aglomerantes;
- Solução de $H_2O+NaOH$ produzida em 10 molar e Silicato de sódio como agente ativador alcalino;
- Areia e resíduo de construção e demolição (RCD) como agregado miúdo;

A Figura 6 apresenta todas as matérias primas utilizadas para produção da argamassa geopolimérica.

Figura 6 - Matérias primas utilizadas para produção da argamassa geopolimérica: a) MK, b) CCA, c) Silicato de sódio, d) RCD, e) Areia, f) Solução NaOH 10 molar.



Fonte: Autor (2017).

3.1.1 Metacaulim (MK) e Cinza de Casca de Arroz (CCA)

Como fonte de alumina e sílica para composição dos aglomerantes utilizou-se 85% de metacaulim e 15% de cinza de casca de arroz, que formam a parte dos aglomerantes da argamassa geopolimérica. O metacaulim foi disponibilizado pela empresa Metacaulim Brasil e segue as especificações da norma NBR15894/10. A cinza de casca de arroz é um resíduo gerado pela empresa SVA – Sílica Verde do Arroz Ltda na geração de energia.

Os ensaios de caracterização do metacaulim foram realizados pelo Núcleo de Pesquisa CERMAT, em 2015. A densidade real ($3,17 \text{ g/cm}^3$) foi determinada pelo uso de um picnômetro Ultracycrometer 1200 P/N.

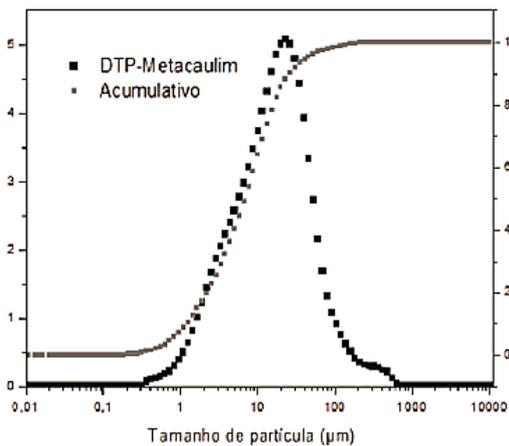
A composição química do material foi determinada por fluorescência de raios-X, cujos resultados são apresentados na Tabela 2. O tamanho médio das partículas foi de $21 \mu\text{m}$ e de $D_{50} = 6,5 \mu\text{m}$ (Figura 7). Através da difração de raios-x (Figura 8) foram identificadas as seguintes fases: caulinita (K), quartzo (Q) e mica (L), sendo formadas por Si e Al, mas apresentam estruturas diferentes (MACCARINI, 2015).

Tabela 2 – Composição química do Metacaulim determinado por FRX.

Óxidos	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	SO ₃	Perda ao fogo	Área específica
Teor (%)	32,60	0,08	2,26	2,13	0,59	<0,05	<0,05	0,06	57,12	1,51	2,6%	32700 m ² /kg

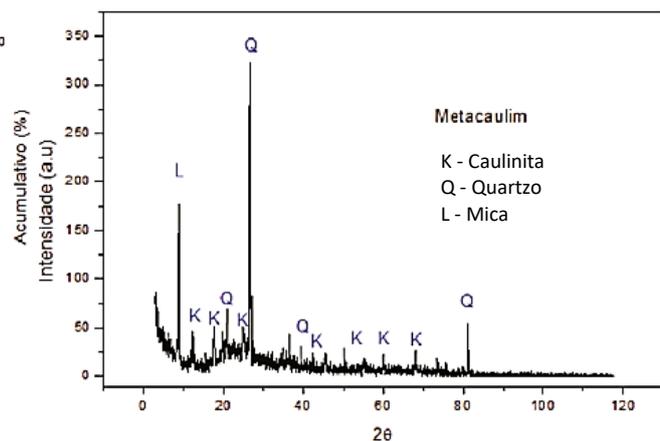
Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT (2015).

Figura 7 – Determinação do tamanho da partícula do Metacaulim.



Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT (2015).

Figura 8 – Difração de raios-X do Metacaulim.



Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT (2015).

É possível observar que o metacaulim possui quantidades expressivas de sílica e alumina. Porém, os picos observados na Figura 8 mostram que parte desses materiais encontram-se cristalizados. Dessa forma, a sílica e alumina presente no metacaulim não é totalmente reativa.

A Tabela 3 apresenta a composição da CCA. Pode-se notar que a quantidade de sílica representa mais de 90% de sua composição, podendo ser utilizada para aumentar a relação SiO₂/Al₂O₃ na mistura de acordo com os padrões estipulados por Duxson (2007), proporcionando maior resistência mecânica.

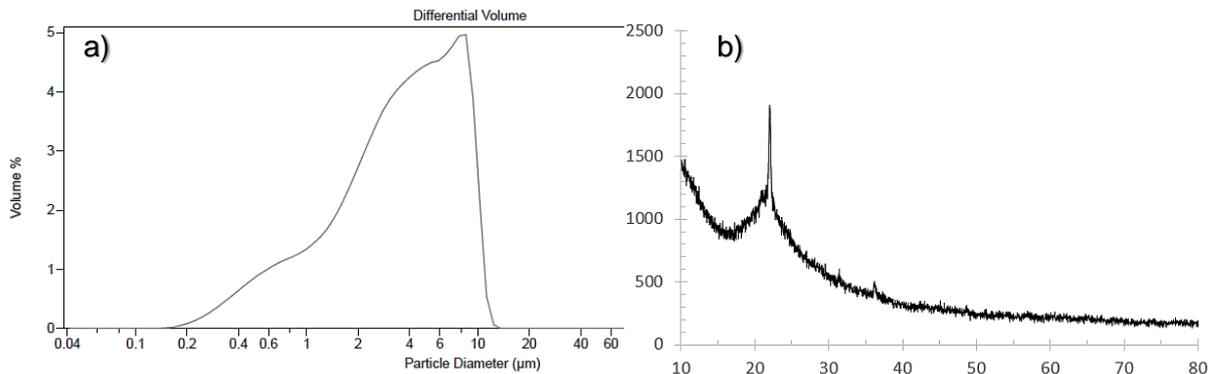
Tabela 3 - Composição química da CCA determinada por FRX.

Óxidos	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	SO ₃	Perda ao fogo	Área específica
Teor (%)	0,00	0,36	0,05	1,40	0,32	0,32	0,04	0,45	91,48	0,15	3,5%	21142 m ² /kg

Fonte: Marangon (2013, p. 3).

A Figura 9 apresenta os ensaios de difração por raio-x e granulometria da CCA realizados em Portugal. Pode-se perceber que a CCA possui uma estrutura predominantemente amorfa.

Figura 9 - a) Curvas Granulométrica da Cinza de Casca de Arroz b) Difração de raio-X da Cinza de Casca de Arroz.



Fonte: COULTER (2016).

3.1.2 Hidróxido de Sódio (NaOH) e Silicato de Sódio (Na₂SiO₃)

Para o ativador composto, foi utilizado uma solução de 10 mols/l de hidróxido de sódio, juntamente com o silicato de sódio. O NaOH empregado é fabricado pela empresa Buschle & Lepper S/A e possui 98% de pureza. Sua escolha foi baseada no baixo custo em relação aos outros ativadores disponíveis no mercado e na ampla utilização por pesquisadores na área. O silicato de sódio neutro Q-79 é fabricado pela mesma empresa e possui uma relação SiO₂/Na₂O de aproximadamente 3,3. As Tabelas 4 e 5 apresentam as especificações dos referidos materiais.

Tabela 4 – Especificações do hidróxido de sódio.

Determinação		Especificação
Concentração (NaOH)	(%)	97 - 100
Carbonatos (Na ₂ CO ₃)	(%)	Máx. 0,60
Cloretos (NaCl)	(%)	Máx. 0,03
Ferro (Fe)	(ppm)	Máx. 6,0
Densidade	(g/cm ³)	2,13 - 2,20
Aspecto Visual		Escamas

Fonte: Departamento Técnico Buschle & Lepper S/A, 2006.

Tabela 5 – Especificações do silicato de sódio.

Determinação		Especificação
Densidade a 25°C	(g/cm ³)	1,390 - 1,420
Viscosidade	(cP)	250 - 500
Óxido de sódio	(%)	8,50 - 9,20
Óxido de silício	(%)	27,8 - 39,0
Sólidos totais	(%)	37,0 - 39,0
Relação (SiO ₂ /Na ₂ O)		3,02 - 3,59
Água	(%)	61,0 - 63,0

Fonte: Departamento Técnico Buschle & Lepper S/A, 2014.

3.1.3 Areia e Resíduo de Construção e Demolição (RCD)

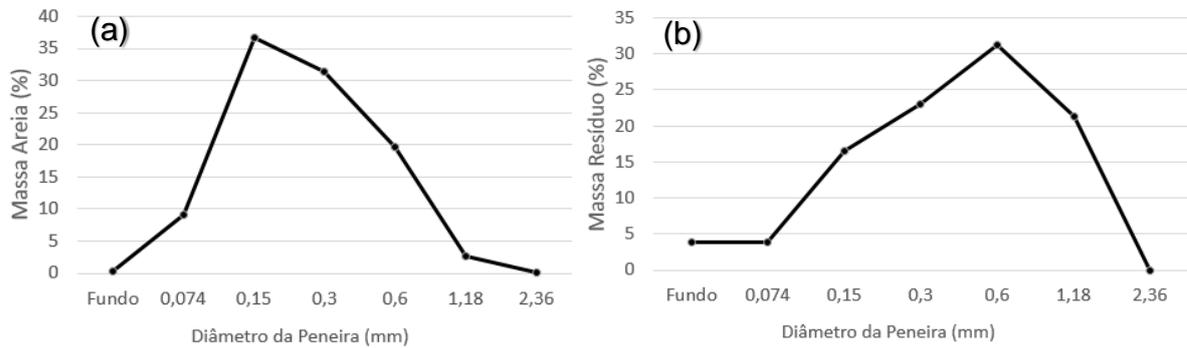
Os agregados minerais utilizados na composição do traço foram uma areia de origem silícea com massa unitária igual a 1,59 g/cm³, fornecida pela empresa Supremo Concreto, e o resíduo de construção e demolição com massa unitária igual a 1,12 g/cm³, fornecido pela empresa Vitaciclo S.A. – Logística Reversa (Figura 10). As granulometrias da areia e do RCD (Figura 11) foram determinadas utilizando um peneirador de areias vibratório, com peneiras nos tamanhos 0,074, 0,15, 0,3, 0,6, 1,18, 2,36 mm.

Figura 10 – Empresa Vitaciclo S.A., fornecedora do RCD.



Fonte: Autor (2017).

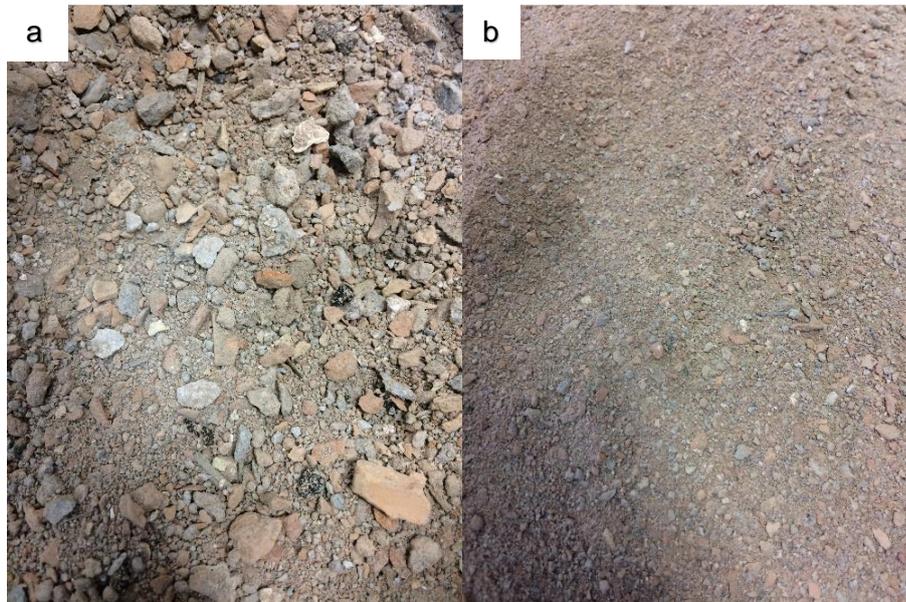
Figura 11 – Composição Granulométrica: a) Areia; b) RCD



Fonte: Autor (2017).

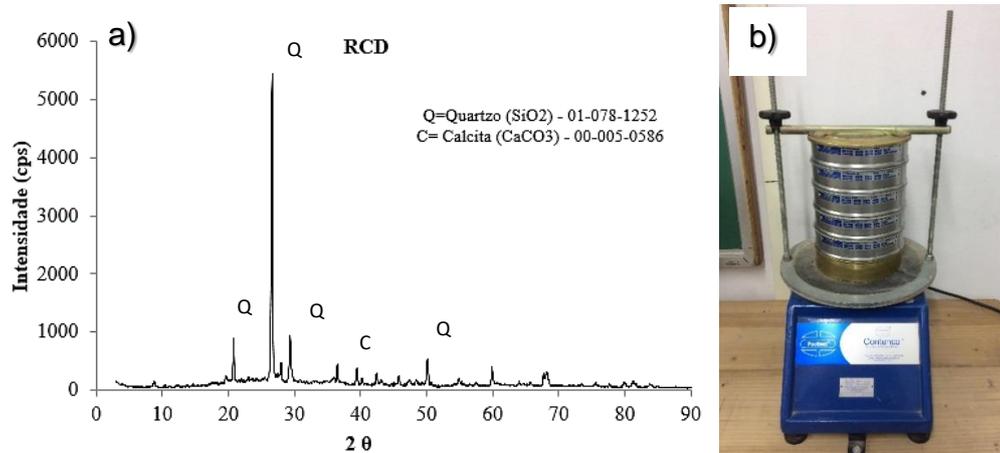
É importante salientar que o RCD fornecido pela empresa Vitaciclo continha uma granulometria diversificada (Figura 12). Para a utilização no presente trabalho, manteve-se a sua granulometria o mais próximo da areia utilizada. Para isso, todo RCD não-passante na peneira 2,36mm foi descartado. A Figura 13 a seguir apresenta os ensaios de difração de raio-X realizados no material e o peneirador vibratório utilizado.

Figura 12 - Resíduo de construção e demolição: a) fornecido pela empresa Vitaciclo, b) RCD passante na peneira 2,36mm.



Fonte: Autor (2017).

Figura 13 – a) Ensaio de difração de raio-X no RCD; b) peneirador vibratório.



Fonte: Figura (a): Núcleo de Pesquisas CERMAT (2016); Figura (b): Autor (2017).

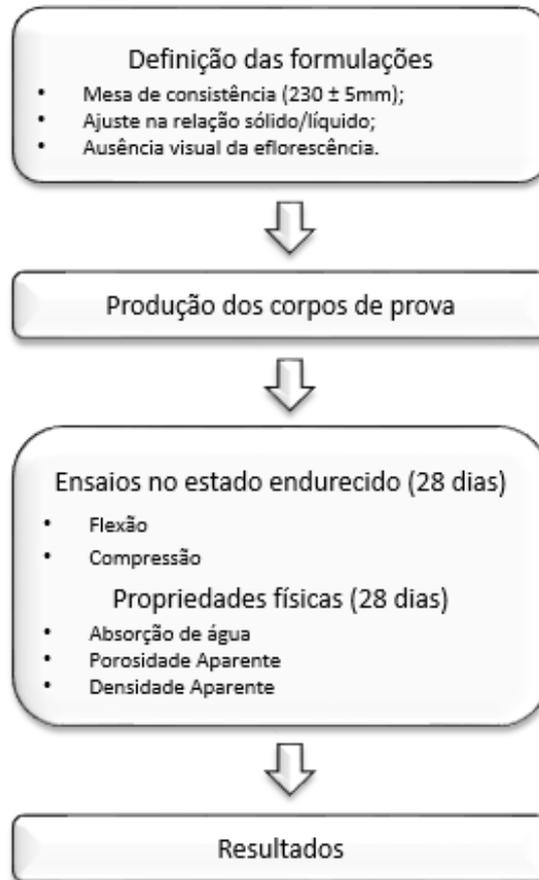
3.2 Metodologia Experimental

O trabalho consiste em duas etapas que formam a metodologia experimental. A primeira parte, baseia-se na definição das formulações e produção dos corpos de prova, enquanto a segunda parte refere-se aos ensaios propostos para caracterização das amostras.

Os principais critérios a serem seguidos neste trabalho de pesquisa foram: a abertura na mesa de consistência (230 ± 5 mm), a ausência visual da eflorescência nos corpos de prova, maximizar a dosagem do RCD nas amostras e obter uma resistência mecânica interessante para aplicação como blocos de alvenaria.

Foram produzidos 3 corpos de prova prismáticos, no tamanho 4x4x16cm, para cada formulação para os ensaios físicos e mecânicos com 28 dias de cura. A Figura 14 resume as etapas e ensaios para desenvolvimento do trabalho.

Figura 14 - Plano experimental do trabalho.



Fonte: Autor (2017).

Para poder analisar o comportamento das argamassas frente ao uso do RCD em substituição da areia, optou-se por manter a fonte de aluminossilicatos sendo 85% de metacaulim e 15% cinza de casca de arroz e o traço cimento/areia em 1:2 para todas as amostras. Visando a aplicação da mistura, a trabalhabilidade (abertura na mesa de consistência) também foi mantida constante. Para isso, a relação sólido/líquido em cada formulação precisou ser alterada.

Os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável - LabICons da UFSC de Joinville, no Núcleo de Pesquisa em Materiais Cerâmicos e Compósitos do Laboratório (CERMAT) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC de Florianópolis e no Laboratório de Resistência dos Materiais do Centro Universitário Católica de Santa Catarina – Joinville.

3.2.1 Definição das Formulações e Produção das Amostras

Tendo a composição de todas as matérias primas e com base nas relações existentes nas literaturas, foi definida uma amostra de referência (0% RCD). A partir dela, pode-se definir as formulações substituindo a areia pelo RCD nas porcentagens 25, 50, 75 e 100% (em massa), a fim de analisar o comportamento nos estados fresco e endurecido das argamassas geopoliméricas.

Seguindo o foco inicial, o metacaulim, a cinza de casca de arroz e o traço foram todos mantidos constantes. Visto que a areia e o RCD apresentam comportamentos diferentes quanto a densidade, formato dos grãos, composição e tamanho das partículas, foi necessária a correção na proporção sólido/líquido de cada formulação através do ensaio na mesa de consistência, visando a aplicação e proximidade na fluidez entre as mesmas.

Toda a água da mistura provém da solução de hidróxido de sódio e do silicato de sódio (65 e 35% respectivamente). Dessa forma, as alterações na relação sólido/líquido alteraram a quantidade desses materiais proporcionalmente. Logo, por mais que seja necessário adicionar mais água a medida que aumenta a quantidade de RCD nas formulações, a sílica presente no silicato de sódio compensa, em partes, a perda que eventualmente pode ocorrer nas propriedades mecânicas do material. Essa decisão foi o ponto chave do trabalho, pois notou-se que a adição de água para correção da trabalhabilidade gera eflorescência nos corpos de prova.

A Tabela 6 apresenta as composições, em massa, utilizadas na produção dos corpos de prova.

Tabela 6 - Formulação das amostras, em massa, para produção dos corpos de prova.

Formulação	MK (g)	CCA (g)	Areia (g)	Resíduo (g)	S/L	Solução 10M (g)	Silicato (g)
0% RCD	425,0	75,0	1000,0	0,0	1,60	273,2	176,4
25% RCD	425,0	75,0	750,0	250,0	1,48	295,4	190,7
50% RCD	425,0	75,0	500,0	500,0	1,38	316,8	204,5
75% RCD	425,0	75,0	250,0	750,0	1,25	349,7	225,8
100% RCD	425,0	75,0	0,0	1000,0	1,15	380,1	245,4

Fonte: Autor (2017).

Para manutenção constante da relação H_2O/Na_2O , a solução 10M e o silicato de sódio são alterados de forma equivalente. Todas as relações se encontram dentro do limite indicado pela literatura, exceto a relação de SiO_2/Al_2O_3 das três últimas formulações. Entretanto, muitos autores defendem o uso dessa relação acima do limite, o que proporciona um aumento na resistência do material. A Tabela 7 mostra as relações obtidas.

Tabela 7 – Relações obtidas das formulações de argamassa geopolimérica.

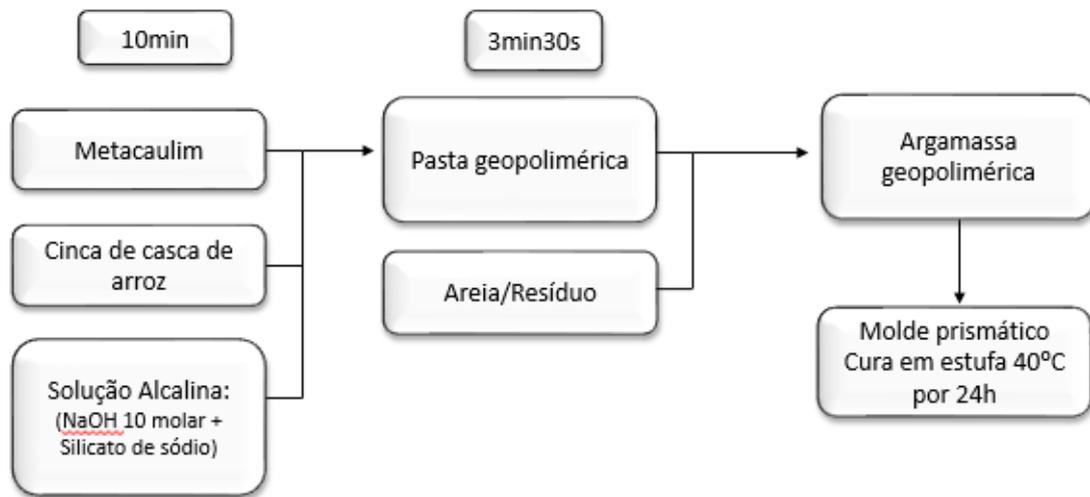
Formulação	SiO_2 / Al_2O_3	Na_2O / Al_2O_3	Na_2O / SiO_2	H_2O / Na_2O	Relação	Padrão
0% RCD	4,44	1,02	0,23	12,54	SiO_2 / Al_2O_3	3,3 -- 4,5
25% RCD	4,49	1,10	0,24	12,54	Na_2O / Al_2O_3	0,8 -- 1,6
50% RCD	4,54	1,18	0,26	12,54	Na_2O / SiO_2	0,2 -- 0,48
75% RCD	4,62	1,30	0,28	12,54	H_2O / Na_2O	10 -- 25
100% RCD	4,69	1,42	0,30	12,54		

Fonte: Autor (2017).

É interessante ressaltar que nem toda sílica e alumina presente nos materiais e que são levados em consideração nos cálculos das relações é amorfa e reativa. Por isso, mesmo com as relações dentro do padrão estabelecidas pela literatura, pode ocorrer o surgimento de eflorescência nos corpos de prova. Portanto, para formulação referência (0% RCD) buscou-se relações de Na_2O/Al_2O_3 e Na_2O/SiO_2 próximas ao limite inferior. Visto que, para correção da trabalhabilidade nas outras formulações, há acréscimo das soluções alcalinas e conseqüentemente maior risco no surgimento de eflorescência.

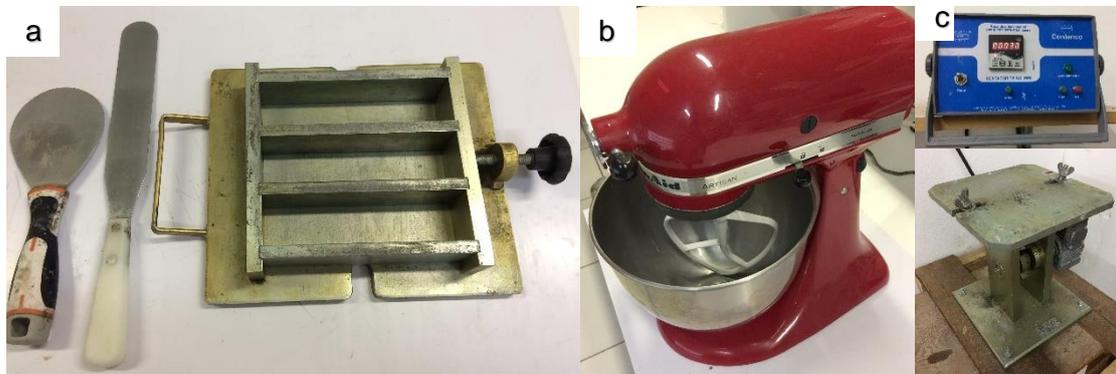
Foi seguido o mesmo roteiro para o procedimento experimental de preparo de todas as amostras (Figura 15). Para mistura da argamassa foi utilizado um misturador mecânico durante 13min30s, sendo os primeiros 10min para ativação dos materiais aluminossilicatos. Para produção dos corpos de prova, seguiu-se a NBR 13279/15 e os equipamentos utilizados são mostrados na Figura 16.

Figura 15 - Fluxograma do procedimento para produção dos corpos de prova.



Fonte: Autor (2017).

Figura 16 – Equipamentos utilizados para produção da argamassa geopolimérica: a) Espátulas e moldes, b) Misturador mecânico, c) Mesa de adensamento com contador de golpes.



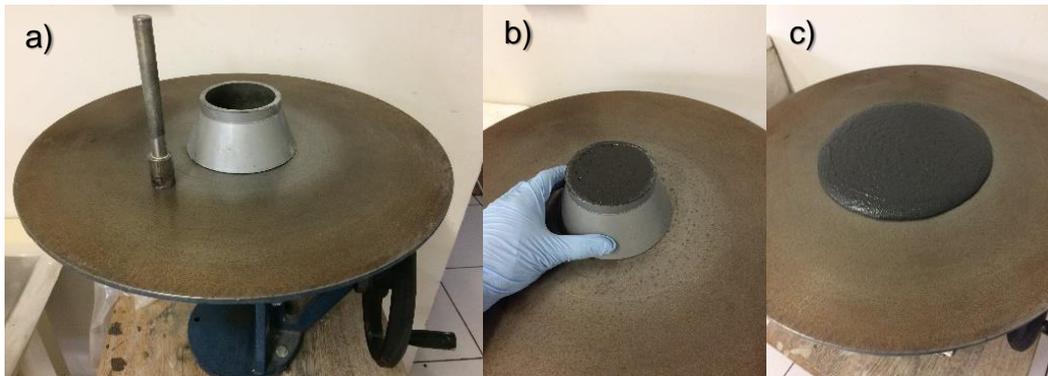
Fonte: Autor (2017).

3.2.2 Ensaio no Estado Fresco

O ensaio no estado fresco serve como parâmetros de consistência e plasticidade da argamassa, sendo especificado pelas normas NBR 7215/97 e 13276/16. O ensaio na mesa de consistência foi utilizado para definir a quantidade de água utilizada em cada formulação. Ajustou-se a relação sólido/líquido em todas as formulações com o objetivo de se obter uma abertura de 230 ± 5 mm. A abertura da

amostra de referência (0% RCD) foi de 232mm. A Figura 17 a seguir apresenta os equipamentos utilizados para realização do ensaio.

Figura 17 – Equipamentos para ensaio na mesa de consistência: a) Mesa de consistência, b) Moldagem do corpo de prova, c) Abertura da formulação de referência.



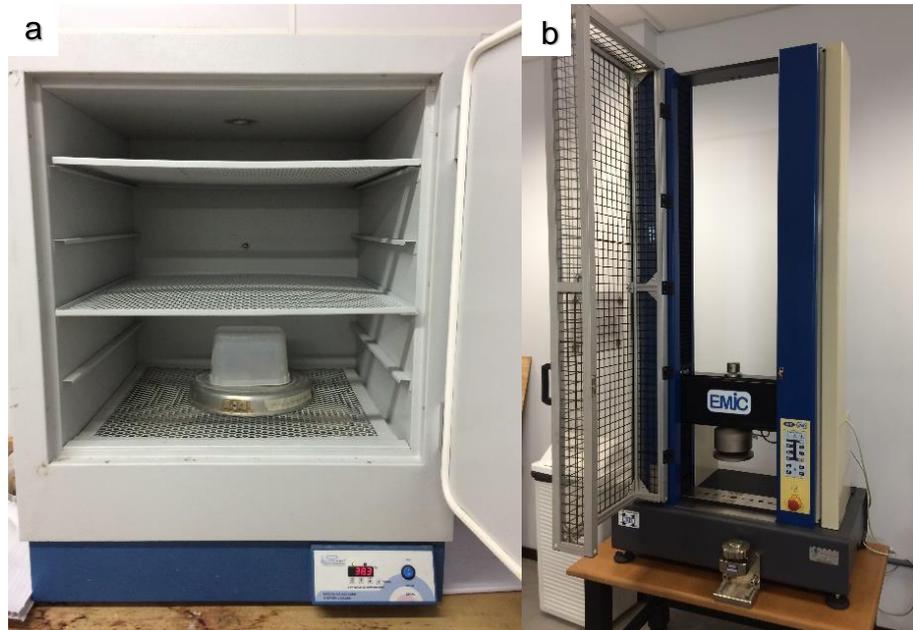
Fonte: Autor (2017).

3.2.3 Ensaios no Estado Endurecido

Para a realização dos ensaios no estado endurecido, foram produzidos três corpos de prova de formato prismático para cada formulação proposta. Afim de acelerar o processo de cura e proporcionar maior resistência mecânica, os mesmos permaneceram dentro de uma estufa a 40°C durante 24 horas (Figura 18a).

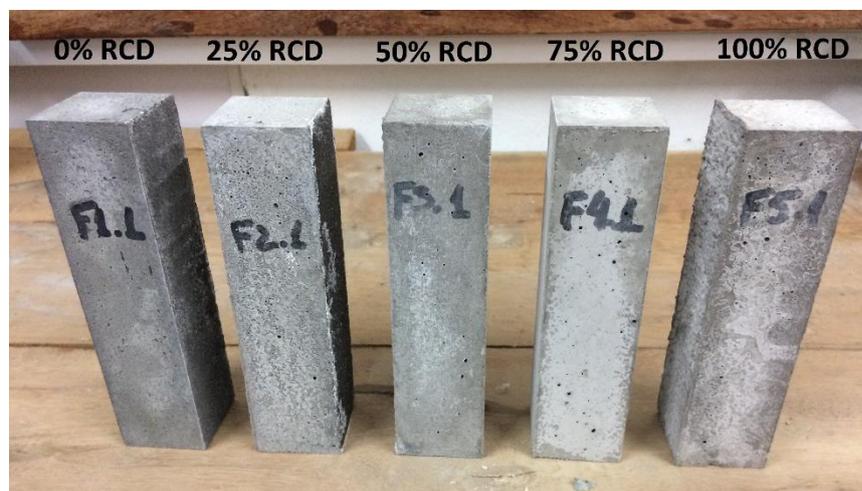
Após esse período, foram desmoldados e colocados em temperatura ambiente até o rompimento para ensaio de flexão e compressão com 28 dias (Figura 19). O ensaio foi realizado no laboratório de resistência dos materiais do Centro Universitário Católica de Santa Catarina – Joinville. O equipamento utilizado foi uma máquina universal para ensaios mecânicos, modelo EMIC 23-100, tendo capacidade de 100kN (Figura 18b).

Figura 18 – Equipamentos utilizados no presente trabalho de pesquisa: a) Estufa, b) Máquina para ensaios mecânicos.



Fonte: Autor (2017).

Figura 19 - Corpos de prova em argamassa geopolimérica para ensaios físicos e mecânicos.



Fonte: Autor (2017).

3.2.3.1 Propriedades Físicas: Absorção de Água, Densidade e Porosidade Aparente

Para a caracterização das propriedades físicas (absorção de água, densidade e porosidade aparente) foi realizado o ensaio de Arquimedes aos 28 dias de cura

(Figura 20). Onde é necessário secar as amostras a 105°C por 24 horas para determinar a massa seca (M_s); imergir as amostras em um recipiente com água, a fim de promover o preenchimento dos poros, durante 72 horas; após esse período, realizar a medição da massa do corpo de prova imerso (M_i); e em seguida medição da massa da amostra saturada com superfície seca (M_{SSS}).

Figura 20 – a) Medição em massa da amostra imersa, b) Medição em massa da amostra saturada com superfície seca, c) Imersão dos corpos em água.



Fonte: Autor (2017).

Com base nessas medições, pode-se determinar as propriedades físicas para cada uma das formulações utilizando as equações abaixo:

$$\text{Absorção de água} = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} * 100 \quad (2)$$

$$\text{Densidade Aparente} = \frac{M_s}{M_{SSS} - M_i} \quad (3)$$

$$\text{Porosidade Aparente} = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_{SSS} - M_i} * 100 \quad (4)$$

Onde:

M_s = Massa seca

M_i = Massa imersa

M_{SSS} = Massa saturada de superfície seca

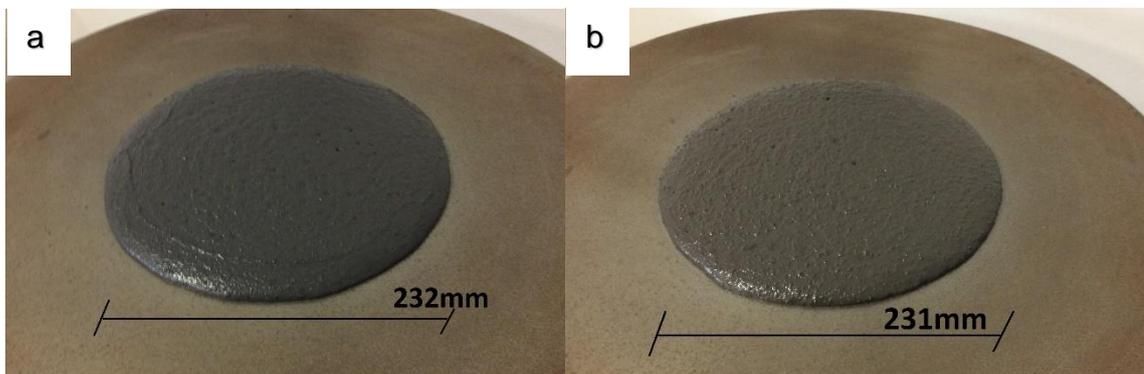
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo serão apresentados os resultados e discussões relativos aos ensaios de caracterização das formulações testadas.

4.1 Ensaios no Estados Fresco

A fixação da abertura na mesa ($230 \pm 5\text{mm}$) foi uma importante etapa do trabalho, pois influencia o teor de água utilizado nas misturas (Figura 21). Das análises realizadas nos materiais, junto com a prática no laboratório, pode-se perceber que as formulações com maior quantidade de RCD necessitaram maior quantidade de água.

Figura 21 – Ensaio na mesa de consistência para determinação da quantidade de água nas formulações: a) Formulação referência (0% RCD), b) Formulação 100% RCD.

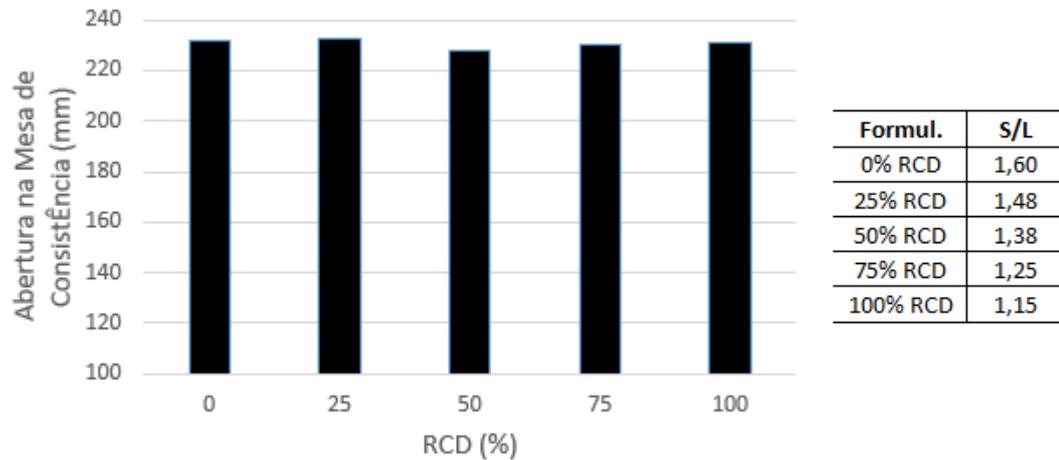


Fonte: Autor (2017).

O ensaio foi realizado logo após a produção das amostras. A amostra de referência (0% RCD) apresentou uma abertura de 228mm, com uma relação sólido/líquido de 1,60. A própria composição do RCD e sua menor massa unitária em relação a areia utilizada, resulta em maior quantidade de água. Desse modo, a formulação 100% RCD necessitou de uma relação S/L de 1,15 para abrir próximo a formulação referência, com 231mm.

Utilizando a correção na relação S/L através das soluções alcalinas (NaOH + silicato) ao invés de água, foi possível fugir da eflorescência nos corpos de prova.

Figura 22 – Resultado médio do espalhamento na mesa de consistência das argamassas geopoliméricas.

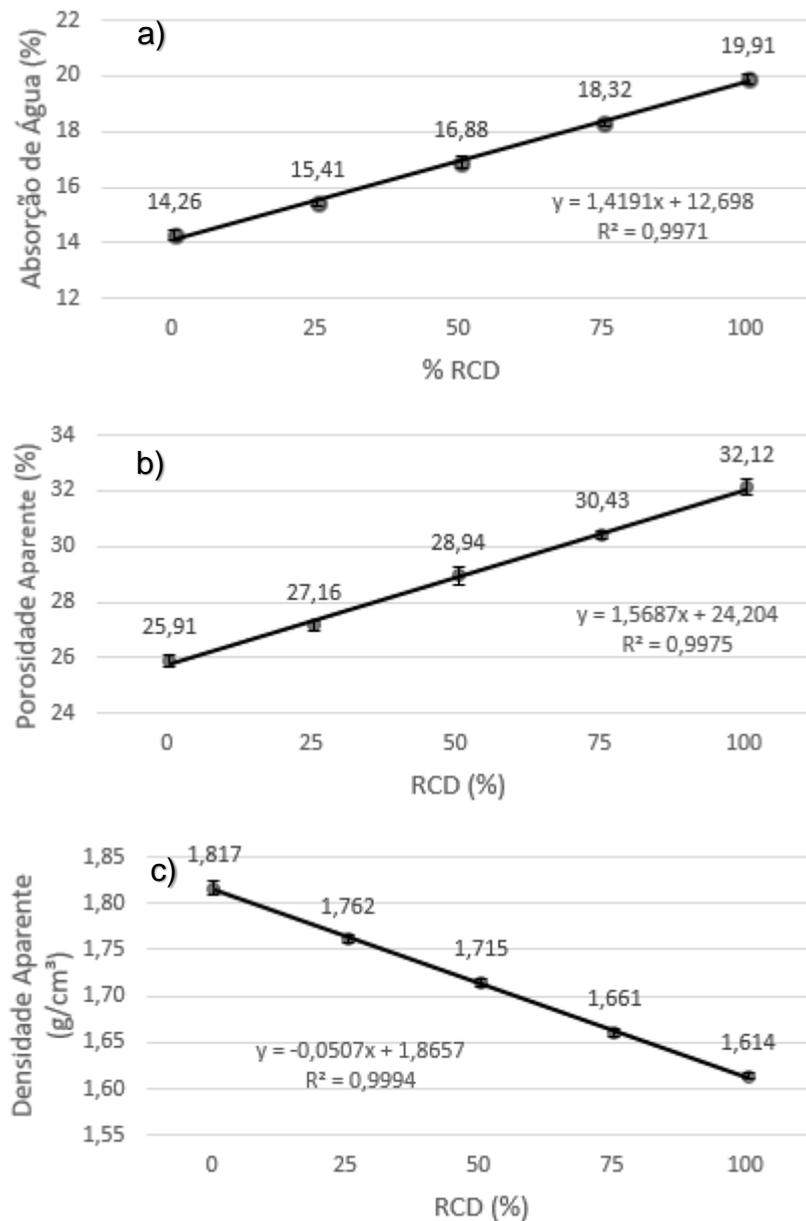


Fonte: Autor (2017).

4.2 Propriedades Físicas: Absorção de Água, Densidade e Porosidade Aparente

Os resultados das propriedades físicas (absorção de água, densidade e porosidade aparente) são apresentados na Figura 23. Pode-se perceber que a medida que a quantidade de RCD aumentou nas formulações, a absorção de água aumenta, apresentando um comportamento linear, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9971 e desvios-padrões baixos. O aumento da absorção de água das formulações 50% RCD e 100% RCD foi de 18,3 e 39,6% respectivamente. Isso ocorreu devido a composição do RCD conter materiais porosos que absorvem maior quantidade de água quando comparados com a areia utilizada na formulação referência.

Figura 23 – Propriedades físicas das argamassas geopoliméricas com 28 dias:
a) Absorção de água, b) Porosidade aparente, c) Densidade aparente.



Fonte: Autor (2017).

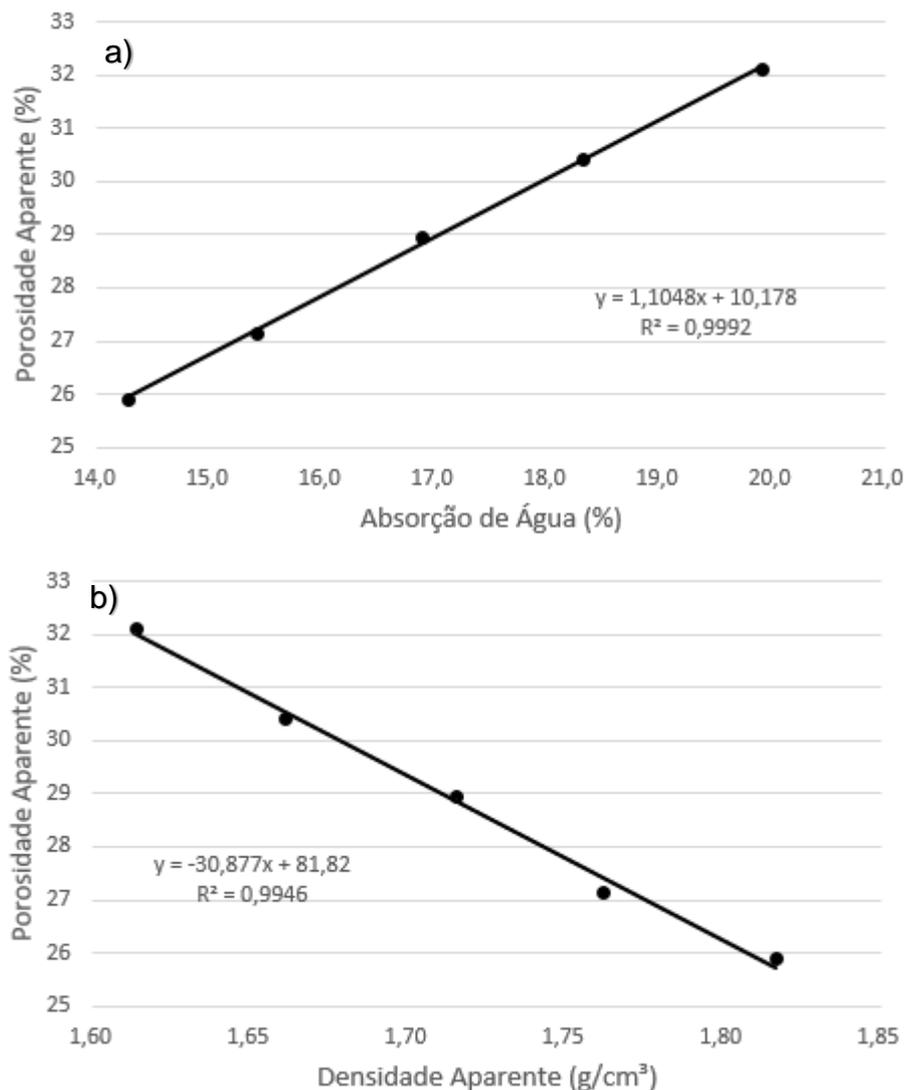
Os resultados da porosidade aparente (Figura 23b) seguem a mesma tendência que a absorção de água, aumentando 11,7 e 24,0% nas formulações 50% RCD e 100% RCD, respectivamente, em relação a REF. Isso acontece devido a absorção de água ocorrer, na maior parte, através dos poros, fazendo com que esses resultados apresentem um comportamento semelhante.

Os resultados da densidade aparente (Figura 23c) decrescem a medida que a quantidade de RCD aumenta nas formulações. Esse comportamento se apresenta

inverso ao da absorção de água e porosidade aparente das formulações. A maior densidade aparente foi obtida na amostra de referência (0% RCD), sendo 1,817 g/cm³. As amostras 50% RCD e 100% RCD apresentaram menor densidade aparente, com 1,715 e 1,614 g/cm³, representando uma redução de 5,6 e 11,2% respectivamente. Isso ocorreu devido o RCD ter uma massa unitária inferior a areia. Além de possuir maior quantidade de líquido em sua composição, e após a cura, a água presente evapora e deixa um vazio na matriz.

A Figura 24 apresenta as relações obtidas entre a porosidade aparente com a absorção de água e densidade aparente das argamassas.

Figura 24 - Relação entre as propriedades físicas das argamassas geopoliméricas:
a) Porosidade aparente vs Absorção de água, b) Porosidade vs Densidade aparente.



Fonte: Autor (2017).

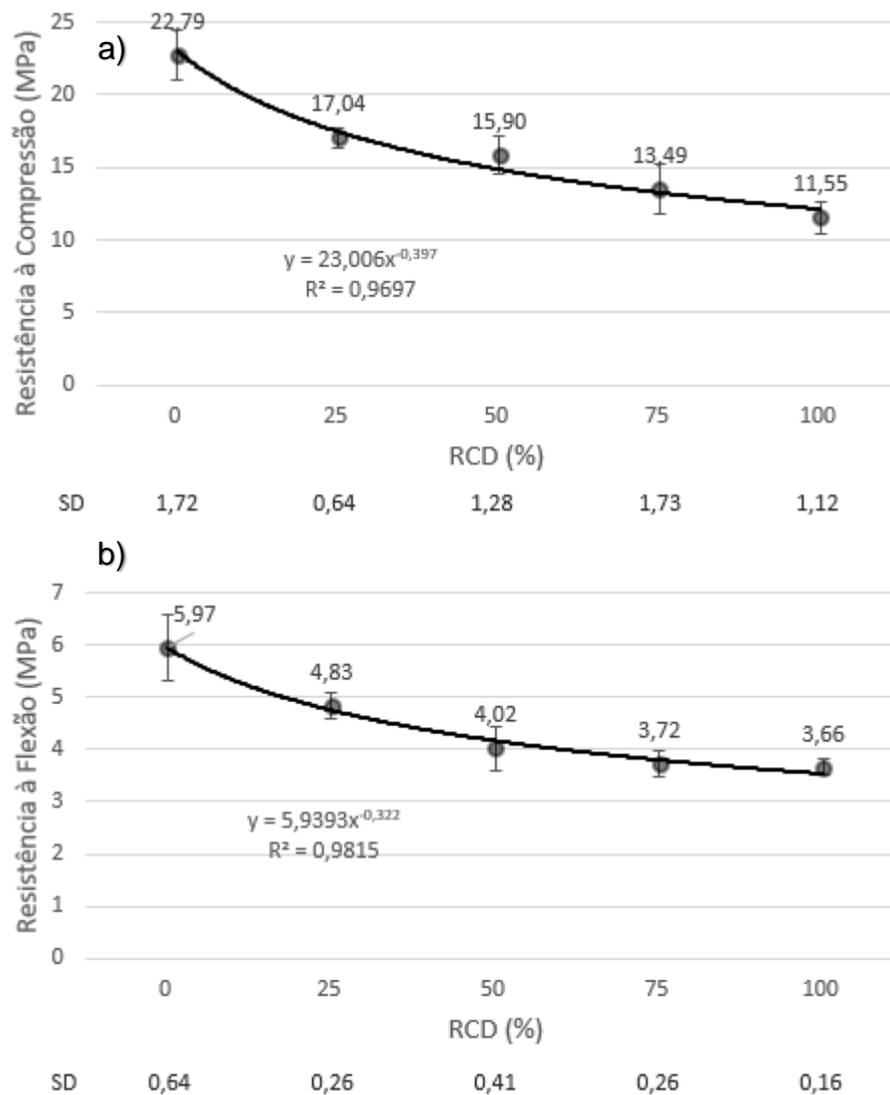
Os resultados da Figura 24 mostram que a matriz com maior número de poros é mais suscetível a absorção de água. Pode-se perceber a total relação entre as propriedades de forma linear, em que a variação na quantidade RCD altera de forma constante os poros da matriz e a densidade da mesma.

4.3 Resistência à Flexão e Compressão

Os valores da resistência à compressão (Figura 25a) obtidos aos 28 dias representaram um comportamento muito semelhante as argamassas e concretos convencionais. Em geral, o aumento na quantidade de RCD reduziu o valor máximo alcançado. Por exemplo, a formulação referência (0% RCD) atingiu 22,79 MPa, enquanto a formulação 100% RCD 11,55 MPa. Esse fato pode ser atribuído a maior porosidade causada certamente pelo teor de líquido adicional. Embora a resistência tenha diminuído com a presença do RCD, os resultados são satisfatórios, pois atendem a resistência mínima estipulada para as aplicações como blocos de alvenaria.

Os valores da resistência à flexão são apresentados na Figura 25b. A formulação 0% RCD alcançou o maior valor de resistência, atingindo 5,97 MPa, enquanto a formulação 100% RCD 3,66 MPa.

Figura 25 - Resistência mecânica da argamassa geopolimérica com 28 dias de cura:
a) Compressão, b) Flexão.



Fonte: Autor (2017).

Os resultados mostram que os aumentos sucessivos na quantidade de RCD implicam na redução da resistência, sendo mais significativa para as adições de 25 e 50%. A partir delas a redução da resistência mecânica foi menos abrupta. Isso ocorre devido ao RCD ser um material poroso e menos denso que a areia e como a pesquisa baseou-se por medições em massa, o volume de RCD adicionado ao substituir a areia é bem maior. Além do mais, o RCD possui em sua composição materiais que absorvem grande quantidade de água, como por exemplo tijolos, telhas e isopor. Todos esses fatores fazem com que, para manter a mesma trabalhabilidade, foi necessário adicionar maior quantidade de líquido (soluções alcalinas) nas

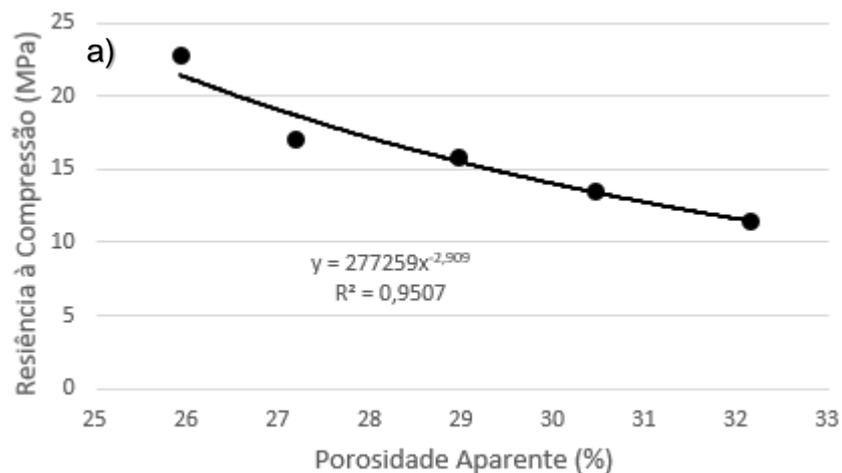
formulações com RCD. Essa água presente nas soluções alcalinas (NaOH 10M e silicato de sódio) geram poros ao evaporar, diminuindo a área que efetivamente resiste às cargas aplicadas.

Pode-se perceber que a diferença dos resultados a compressão e tração na flexão são grandes, o que ocorre da mesma forma com as argamassas e concretos convencionais, onde a resistência a tração na flexão é na ordem de: $0,3 \times \sqrt{f_{ck}}$. Por exemplo, uma argamassa com resistência à compressão de 25 MPa, tem aproximadamente uma resistência a flexão de 1,5 MPa. Portanto, a resistência a flexão nas argamassas geopoliméricas se apresentam acima do tradicional.

4.4 Relações Entre Propriedades Físicas e Mecânicas

As Figuras 26 e 27 apresentam as relações obtidas entre a resistência mecânica e as propriedades físicas das argamassas.

Figura 26 – Relação da resistência mecânica com as propriedades físicas das argamassas geopoliméricas: a) Resistência à compressão vs Porosidade aparente, b) Resistência à compressão vs Densidade aparente.



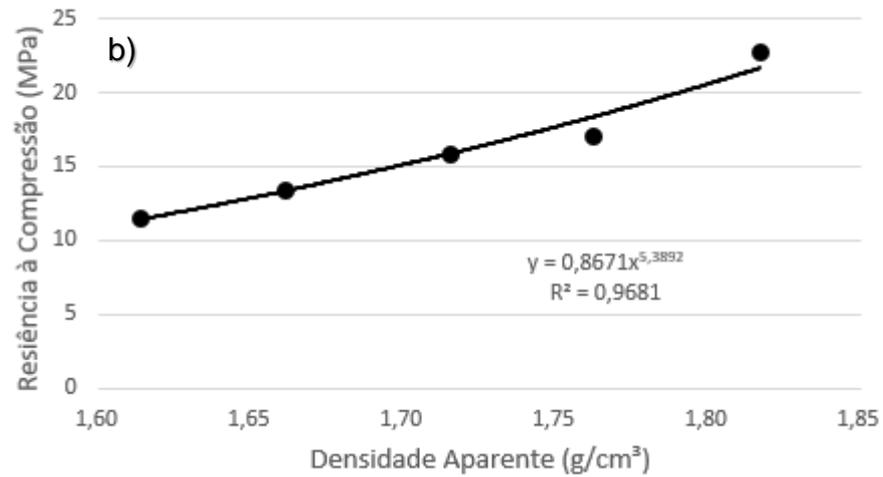
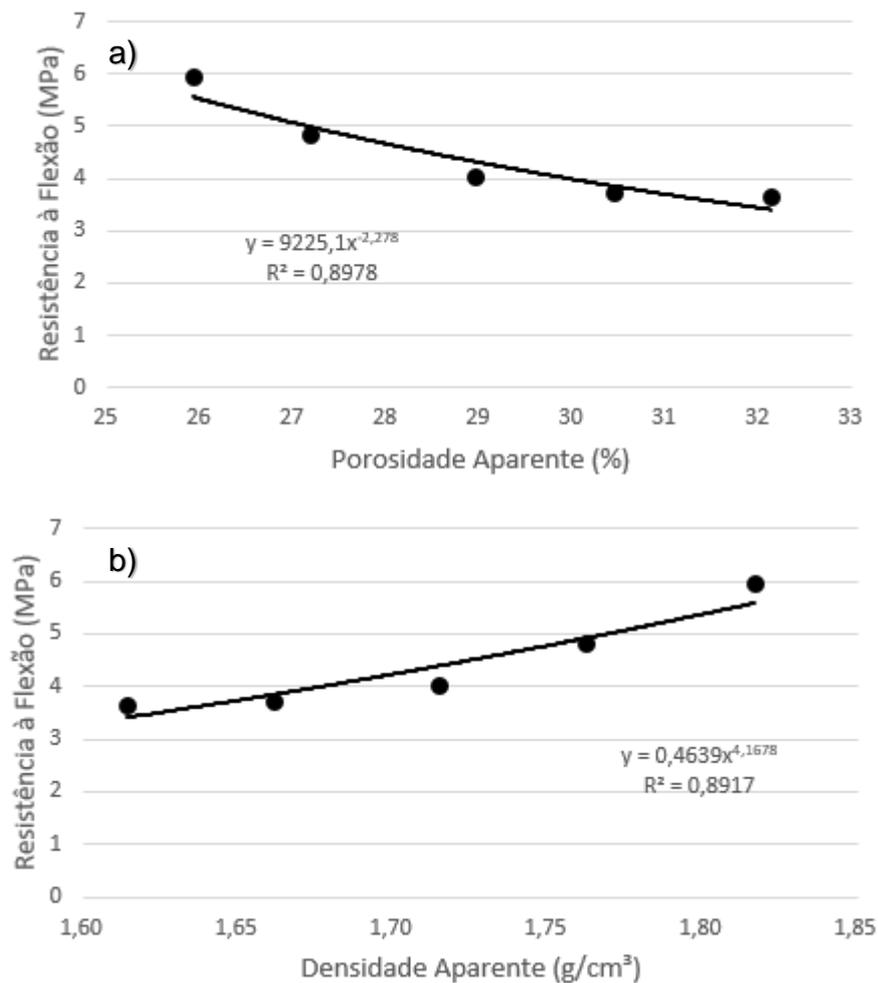


Figura 27 - Relação da resistência mecânica com as propriedades físicas das argamassas geopoliméricas: a) Resistência à flexão vs Porosidade aparente, b) Resistência à flexão vs Densidade aparente.



Fonte: Autor (2017).

Analisando a Figura 26 pode-se perceber que com o aumento da porosidade na matriz a resistência a compressão tende a diminuir. O inverso acontece com a densidade aparente, que ao diminuir promove redução na resistência mecânica das argamassas geopoliméricas. Os resultados podem ser satisfatoriamente descritos através da lei de potência. É possível também, junto com os resultados apresentados na Figura 25, determinar a quantidade de RCD máximo a ser utilizado para um certo tipo de aplicação que necessite maior resistência mecânica.

5 CONCLUSÃO

O ensaio na mesa de consistência, revelou que o aumento sucessivo de RCD na amostra REF, implicou na redução da fluidez das amostras. Isso ocorre devido a vários fatores: a característica física no formato dos grãos presentes no RCD; o tamanho médio dos grãos; e a massa unitária do RCD ser menor que da areia (como as medições foram em massa, o volume de RCD adicionado é maior, absorvendo maior quantidade de água). Dessa forma, foi necessária uma correção significativa na relação S/L de cada formulação para se manter a mesma trabalhabilidade das misturas. E essa correção não pode ser através de água adicional, mas sim do aumento proporcional das soluções alcalinas utilizadas nas formulações.

Os resultados da porosidade aparente e a absorção de água aumentaram à medida que é acrescida a quantidade de RCD na mistura, 24 e 39,6% para as amostras 50% RCD e 100% RCD, respectivamente. Entretanto, os resultados da densidade aparente apontam uma redução de 11,2% entre a formulação 0% RCD e 100% RCD. Vale salientar que os comportamentos das propriedades físicas foram de acordo com o esperado, mostrando coerência nos valores obtidos e que todos os resultados das propriedades físicas seguem uma relação linear.

A resistência mecânica a compressão e flexão reduziram com maiores quantidades de RCD nas amostras e podem ser descritos através de uma relação de potência. As formulações 50% RCD e 100% RCD apresentaram uma redução de 30,2 e 49,3% respectivamente. Embora a redução é considerável, para aplicação como blocos de alvenaria, a resistência alcançada com as formulações é mais que suficiente. Além de que, através da formulação 100% RCD, provou-se que é possível maximizar o uso do RCD em argamassas. É interessante pontuar que a resistência mecânica foi afetada não só pelo RCD, mas principalmente pela relação S/L, que foi alterada devido a estratégia de manutenção constante da abertura na mesa de consistência. E que embora o aumento do silicato de sódio proporciona em geral um aumento na resistência mecânica, o efeito negativo da água (líquido) adicional

sobrepôs o efeito positivo do silicato de sódio nas propriedades mecânicas das argamassas geopoliméricas.

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho de pesquisa, conclui-se que é possível a utilização dos resíduos de construção e demolição em substituição total a areia em argamassas geopoliméricas. A formulação 100% RCD apresentou-se mais viável, sobretudo pelo lado sustentável, alcançando as resistências mecânicas necessárias para sua utilização.

5.1 Sugestão para Trabalhos Futuros

- Trabalhar com diferentes proporções de solução NaOH e silicato;
- Variar a molaridade da solução NaOH;
- Verificar os resultados mecânicos em idades mais avançadas;
- Analisar a variação na quantidade de cinza de casca de arroz;
- Analisar a adição de um agente formador de poros nas formulações.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997. Disponível em < <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=4534>>. Acesso em 20 abr. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=361653>>. Acesso em 20 abr. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=3685>>. Acesso em 20 abr. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15894:** Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=80623>>. Acesso em 20 abr. 2017.

BOCA SANTA, R. **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. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2012.

BORGES, P. H. R et al. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, abr./jun. 2014.

CABRAL, Antônio Eduardo Bezerra. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** 2007. 280 p. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007.

CASCAES, M. E. L. **Desenvolvimento de geopolímero a partir do uso de metacaulim e cinza de casca de arroz.** 2016. 46 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville. 2016.

CASTRO, A. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 334 p. Tese de doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2007.

CUNHA, M. **Durabilidade de geopolímeros monofásicos**. Dissertação de mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal. 2013.

DAVIDOVITS, J. **30 years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs**. Melbourne, Australia: Geopolymer Institute. 2002.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymer cements**. Geopolymer Institute. Alkaline Cements and concretes, Kiev, Ukraine, 1994.

DUXSON, P et al. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2007.

HARTMANN, E. A. **Argamassa geopolimérica utilizando pó de alumínio como agente formador de poros**. 2016. 54 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville, 2016.

MACCARINI, H. S. **Desenvolvimento de geopolímero a partir do uso de metacaulim**. 2015. 58 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville, 2015.

MARANGON, E. et al. Atividade Pozolânica da Sílica da Casca de Arroz Produzida por Combustão em Leito Fluidizado. **55º Congresso Brasileiro Do Concreto**. 2013.

MATIAS, G. **Argamassas de substituição com resíduos de tijolo cerâmico**. 2010. Disponível em: <http://www.apfac.pt/congresso2010/comunicacoes/Paper%2085_2010.pdf>

NITA, C. **Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibra de celulose e pva**. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica de São Paulo – SP, 128p., 2006.

SENEFF, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W.L. Comportamento reológico de pastas de cimento com adição de sílica ativa, nanossílica e dispersante policarboxílico. **Revista Matéria**, v.15, n. 1, pp. 012 – 020, 2010.

SILVA, S.P. **Geologia do Caulim**, 2. ed. Belém: DNPM 5º DS/DNPM, 1993.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório Anual 2010**. 2011. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/Relatorio2011.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2016.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório Anual 2013**. 2013. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2016.

SINGH, B. et al. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. **Central Building Research Institute**. Roorkee, India, p. 78-90, 2015.

TORGAL, F. P.; CASTRO GOMES, J. P.; JALALI, S. **Cimento Portland Normal Versus Ligantes Geopoliméricos: Considerações Econômicas Sobre as Implicações do Mercado do Carbono no Custo dos Betões**. Castelo Branco, Portugal: Instituto Politécnico de Castelo Branco, 2005.