



Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

**Estudo da influência do rejeito de caulim calcinado
nas propriedades de argamassas para assentamento.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aldemar Batista Tavares de Sousa

Belém – Pará – Brasil

2024

Aldemar Batista Tavares de Sousa

Estudo da influência do rejeito de caulim calcinado nas propriedades de argamassas para assentamento.

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Para, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Coorientadora: Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

Belém-PA, 28 de setembro de 2024.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Aldemar Batista Tavares de Sousa.

TÍTULO: Estudo da influência do rejeito de caulim calcinado nas propriedades de argamassas para assentamento.

GRAU: Mestre ANO: 2024

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Aldemar Batista Tavares de Sousa.

Rua dos Pariquis, nº 3790, Casa. Guamá.
66.063-435 Belém – PA – Brasil.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

S725e Sousa, Aldemar Batista Tavares de.
Estudo da influência do rejeito de caulim calcinado nas
propriedades de argamassas para assentamento / Aldemar Batista
Tavares de Sousa. — 2024.
134 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço Coorientação:
Profª. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro Dissertação
(Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2024.

1. Argamassa de assentamento. 2. Rejeito de caulim. 3.
Cimento Portland. 4. Atividade pozolânica. I. Título.

CDD 620.13



ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO REJEITO DE CAULIM CALCINADO NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS PARA ASSENTAMENTO

AUTOR:

ALDEMAR BATISTA TAVARES DE SOUSA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 28 / 08 / 2024.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Orientador (UFPA)

Andrielli Morais de Oliveira

Profa. Dra. Andrielli Morais de Oliveira

Documento assinado digitalmente

gov.br MARCELO DE SOUZA PICANÇO
Data: 05/09/2024 14:48:46-0300
Verifique em <https://validar.itc.gov.br>

Prof. Dr. Adelson Bezerra de Medeiros
Membro Externo (UFPA)

Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Aldemar Batista Tavares de Sousa

Estudo da influência do rejeito de caulim calcinado nas propriedades de argamassas para assentamento.

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Belém, 28 de setembro de 2024.

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Orientador

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC

Prof. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

Coorientadora

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC

Profa. Dra. Andrielli Moraes de Oliveira

Universidade Federal de Goiás - UFG

Prof. Dr. Adelson Bezerra de Medeiros

Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Belém, 28 de setembro de 2024.

“A indústria do cimento busca novos materiais residuais, com o objetivo de utilizá-los como materiais cimentícios suplementares (MCS).”

(Santos et al.)

Resumo

O dióxido de carbono (CO₂) é responsável por mais de 80% da poluição que acarreta o aquecimento global e a indústria da construção é conhecida como uma importante fonte de emissões de Gases de Efeito Estufa. Os processos de produção de Cimento Portland ainda poluem o meio ambiente. Por isso, a reutilização de resíduos da indústria vem se tornando objeto de estudo em diversas pesquisas. Dentre elas, estão estudos sobre o rejeito resultante do beneficiamento do Caulim (como metacaulim) incorporado em matrizes de cimento. O objetivo desta dissertação é avaliar o efeito da adição do rejeito de caulim calcinado (RCC) no comportamento reológico, físico e mecânico das composições de argamassas para assentamento e fixação de alvenaria, e a viabilidade da utilização desse rejeito como material substituto parcial do cimento Portland composto nas argamassas para assentamento. O processo de tratamento térmico do RCC se deu a uma temperatura de 600°C por um intervalo de tempo de três horas. Posteriormente, foi moído por uma hora. Para a produção das composições de argamassas, foi utilizada uma proporção entre aglomerante e agregado miúdo (areia) de 1:6 (em massa) sendo produzidas cinco composições com diferentes teores de substituição do cimento por RCC que variaram de 10 em 10%, ficando esses de 0%, 10%, 20%, 30% e 40%. Os resultados permitem concluir que o aumento do teor de substituição do cimento Portland por RCC gera modificações interessantes no comportamento das composições de argamassas estudadas, podendo reduzir os custos de uma obra e favorecer o meio ambiente. Dentre as composições analisadas nos ensaios, foi observado que o percentual de 20% é o teor ótimo para a substituição do cimento pelo rejeito de caulim calcinado.

Palavras-chave

Rejeito de caulim calcinado, reação pozolânica, argamassa para assentamento.

Abstract

Carbon dioxide (CO₂) is responsible for more than 80% of the pollution that causes global warming and the construction industry is known as a major source of greenhouse gas emissions. Portland Cement production processes pollute the environment. Therefore, the reuse of industrial waste has become the subject of study in several research projects. Among them, studies on the waste resulting from the processing of Kaolin (as metakaolin) incorporated into cement matrices. The objective of this dissertation is to evaluate the effect of adding calcined kaolin waste (RCC) on the behavior of mortar compositions for laying and fixing masonry, and the feasibility of using this waste as a partial replacement material for Portland cement in mortars for laying. The RCC heat treatment process took place at a temperature of 600°C for three hours. It was then ground for one hour. For the production of the compositions, a ratio between binder and fine aggregate (sand) of 1:6 (by mass) was used, with five compositions being produced with different levels of cement replacement by RCC that varied by 10%, these being 0%, 10%, 20%, 30% and 40%. The results allow us to conclude that increasing the replacement rate of Portland cement by RCC generates interesting changes in the behavior of the studied mortar compositions, which can reduce the costs of a project and benefit the environment. Among the compositions analyzed in the tests, it was observed that the percentage of 20% is the optimal content for replacing cement with calcined kaolin waste.

Key words: Calcined kaolin waste, pozzolanic reaction, mortar for laying.

Lista de Figuras

Figura	Página
Figura 01 - Comparativo da produção brasileira e paraense de caulim entre os anos de 2010 a 2020 (em kt)	25
Figura 02 - Diagrama de blocos do processo de fabricação de cimento Portland.....	29
Figura 03 - Ação das adições minerais no Cimento Portland	35
Figura 04 - Utilização de argamassas de assentamento em obras.....	41
Figura 05 - Funções dos aditivos incorporadores de ar.....	43
Figura 06 - Realização do ensaio de resistência à compressão em corpo de prova prismático.....	44
Figura 07 - Mina de exploração localizada na região do rio Capim.....	58
Figura 08 - Planta Industrial da Imerys em Barcarena.....	59
Figura 09 - Análise de granulometria à laser das amostras de cimento Portland composto (CP II-F-32) e RCC.....	61
Figura 10 - Difratogramas de raios-X das amostras analisadas.....	62
Figura 11 - Variação do percentual de perda de massa (a); e variação térmica pela diferença de temperatura (b).....	65
Figura 12 - Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado nas composições de argamassas.....	68
Figura 13 - Comportamento do índice de consistência (ICs) das composições de argamassas, comparado ao percentual de substituição do cimento Portland composto.....	73
Figura 14 - Realização do ensaio de índice de consistência e teste de bancada na composição de argamassa.....	77
Figura 15 - Realização do ensaio de índice de consistência e teste de bancada em argamassas com 40% de substituição de cimento Portland por RCC.....	77
Figura 16 - Comportamento dos valores dos ensaios de densidade de massa no estado fresco (Df) e do teor de ar incorporado (A).....	79
Figura 17 - Comportamento dos resultados do ensaio de retenção de água Ra/U (%) e do teor de substituição de resíduo (%) em cada composição de argamassa.....	81

Figura 18	- Resultados do ensaio de Absorção por imersão total A (%) e do Teor de ar incorporado A (%) em cada composição de argamassa.....	82
Figura 19	- Comportamento das densidades de massa no estado fresco (Df), no estado endurecido aos 28 dias (DE28) e no estado endurecido aos 91 dias (DE91) em cada composição de argamassa.....	82
Figura 20	- Comparação entre a densidade no estado endurecido aos 28 dias (DE ₂₈) e a relação água cimento em cada composição de argamassa.....	84
Figura 21	- Comportamento dos resultados da absorção por imersão total A (%) e dos índices de vazios Iv (%) de cada composição de argamassa.....	85
Figura 22	- Comportamento dos ensaios de variação dimensional (ϵ_i) (a) e variação de massa (Δm_i) (b) entre a desforma e 28 dias após a desforma.....	86
Figura 23	- Comportamento dos ensaios de variação dimensional (ϵ_i) e variação de massa (Δm_i) na idade de 28 dias.....	87
Figura 24	- Comportamento dos ensaios de resistência à tração na flexão (Rf) e resistência à compressão (Rc) das composições de argamassas, realizados na idade de 28 dias.....	89
Figura 25	- Comportamento dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico (Ed) e de resistência à compressão (Rc / Fa) das composições de argamassas na idade de 28 dias.....	91
Figura 26	- Comportamento dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico (Ed) e de densidade de massa no estado endurecido (DE) das composições de argamassas na idade de 91 dias.....	92
Figura 27	- Comportamento do ensaio de resistência à compressão (Rc) e relação água cimento (a/c) das composições de argamassas na idade de 91 dias.....	93

Lista de Tabelas

Tabela	Página
Tabela 01 - Reservas de Caulim no ano de 2010. (milhões de toneladas - Mt).....	24
Tabela 02 - Designação normalizada, siglas e classes de resistência do Cimento Portland.....	31
Tabela 03 - Limites de composição do Cimento Portland (porcentagem de massa)...	32
Tabela 04 - Requisitos e respectivos critérios para argamassas inorgânicas para assentamento e fixação – Estado fresco.....	49
Tabela 05 - Valores limites para classificação da densidade de massa no estado fresco.....	50
Tabela 06 - Requisitos e respectivos critérios para argamassas inorgânicas para assentamento e fixação – Estado endurecido.....	50
Tabela 07 - Classes de uso e respectivos critérios de resistência à compressão da argamassa inorgânica AAE.....	51
Tabela 08 - Características físicas e mecânicas do cimento CP II-F-32.....	57
Tabela 09 - Relação de ensaios realizados na caracterização do RCC.....	60
Tabela 10 - Resultados obtidos no ensaio de Fluorescência de raios-X na amostra de RCC.....	63
Tabela 11 - Resultado IAP com Cimento Portland.	64
Tabela 12 - Resultados dos demais ensaios de caracterização do RCC utilizado nas composições de argamassas da pesquisa em questão.....	65
Tabela 13 - Denominação das frações granulométricas da areia normal.....	67
Tabela 14 - Caracterização física dos materiais anidros utilizados nas composições de argamassas.....	67
Tabela 15 - Características técnicas do aditivo plastificante.....	69
Tabela 16 - Quantidade de materiais e suas relações utilizados na produção de argamassas com 500g de aglomerante e 3000 g de areia em suas composições.....	70
Tabela 17 - Relação dos ensaios para a caracterização das argamassas inorgânicas para assentamento e para fixação de alvenaria.....	72

Lista de Abreviaturas e Siglas

Símbolo	Significado
<i>a/c</i>	Relação água/cimento
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>AC</i>	Argamassa Colante
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>ATD</i>	Análise Térmica Diferencial
<i>ATG</i>	Análise Termogravimétrica
<i>BDA</i>	Brick Development Association
<i>CADAM</i>	Caulim da Amazônia S.A
<i>CaO</i>	Óxido de cálcio
<i>CEF</i>	Caixa Econômica Federal
<i>CFEM</i>	Compensação Financeira pela Exploração Mineral
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono
<i>CP</i>	Cimento Portland
<i>CPI</i>	Cimento Portland Comum
<i>CPII</i>	Cimento Portland Composto
<i>CPII-F</i>	Cimento Portland composto com Fíller
<i>CPIV</i>	Cimento Portland Pozolânico
<i>CPB</i>	Cimento Portland Branco
<i>DRX</i>	Difração de Raio X
<i>DTG</i>	Termogravimetria Derivada
<i>FGV</i>	Fundação Getúlio Vargas
<i>FRX</i>	Fluorescência de Raio X
<i>GEE</i>	Gases de Efeito de Estufa
<i>GWP</i>	Global Warming Potential
<i>HPMC</i>	Hidroxipropilmetilcelulose
<i>IAP</i>	Índice de Atividade Pozolânica
<i>IBRAM</i>	Instituto Brasileiro de Mineração
<i>IEM</i>	Indústria Extrativa Mineral
<i>IPEA</i>	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

<i>IPT</i>	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
<i>IRCC</i>	Imerys Rio Capim Caulim
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization
<i>ITM</i>	Indústria da Transformação Mineral
<i>IC</i>	Índice de consistência
<i>LEC</i>	Laboratório de Engenharia Civil
<i>MET</i>	Microscópios Eletrônicos de Transmissão
<i>MEV</i>	Microscópios Eletrônicos de Varredura
<i>MK</i>	Metacaulim
<i>MME</i>	Ministério de Minas e Energia
<i>MPa</i>	Mega Pascal
<i>MPA</i>	Mineral Products Association
<i>Mt</i>	Milhões de toneladas
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>PF</i>	Perda ao Fogo
<i>PIB</i>	Produto Interno Bruto
<i>PNRS</i>	Política Nacional de Resíduos Sólidos
<i>PPSA</i>	Pará Pigmentos S.A
<i>RAS</i>	Reação álcali-sílica
<i>RCC</i>	Resíduo Calcinado de Caulim
<i>RMB</i>	Região Metropolitana de Belém
<i>SCM</i>	Supplementary Cementing Materials
<i>SINAPI</i>	Sistema Nacional de Pesquisas de Custos e Índices da Construção Civil
<i>SM</i>	Setor Mineral
<i>TG</i>	Termogravimetria
<i>UFCG</i>	Universidade Federal de Campina Grande
<i>UFPA</i>	Universidade Federal do Pará
<i>US</i>	United States
<i>WWF</i>	World Wide Fund

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	15
1.2. JUSTIFICATIVA	18
1.3 OBJETIVOS	21
1.3.1 Objetivos geral e específicos	21
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	23
2.1 CAULIM.....	23
2.1.1 Caulim no Brasil.....	23
2.1.2 Produção de Caulim no Brasil	24
2.1.3 Mineralogia.....	25
2.1.4 Aplicação do Caulim	26
2.1.5 Do Caulim ao rejeito mineral e seu reaproveitamento	26
2.1.6 Classificação do rejeito mineral	26
2.2 CIMENTO PORTLAND	27
2.2.1 Composição Química	29
2.2.2 Hidratação do Cimento	30
2.2.3 Classificação do Cimento Portland	30
2.3 ADIÇÕES MINERAIS	32
2.3.1 Tipos de adições minerais	32
2.4 ARGAMASSAS	35
2.4.1 Definições.....	36
2.4.2 Classificação	37
2.4.3 Componentes	39
2.4.4 Dosagem	39
2.4.5 Propriedades no estado fresco	40
2.4.6 Propriedades no estado endurecido	44
2.4.7 Tipos de argamassas	47
2.5 ARGAMASSAS E REJEITO DE CAULIM.....	52
2.5.1 O tratamento do rejeito de caulim	53
2.5.2 O efeito resíduo de caulim nas argamassas	55

3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
3.1 CIMENTO PORTLAND	57
3.2 REJEITO DO BENEFICIAMENTO DE CAULIM.....	58
3.3 AGREGADO MIÚDO	66
3.1.4 Água.	68
3.1.5 Aditivo Plastificante.....	68
3.2 DOSAGEM E PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
4.1 O EFEITO DO TEOR DE REJEITO DE CAULIM NA TRABALHABILIDADE DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO.....	73
4.2 O EFEITO DO TEOR DE REJEITO DE CAULIM NO COMPORTAMENTO FÍSICO DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO.....	78
4.3 O EFEITO DO TEOR DE REJEITO DE CAULIM NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO.	88
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
5.1 CONCLUSÕES.....	94
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
APÊNDICES	110
APÊNDICE A – TABELAS DE ANÁLISE.	110
A-A-1 Quadro referente ao teor de substituição, traço utilizado, índice de consistência de cada composição, com análise de coesão, plasticidade e aspectos visuais.....	111
A-A-2 Quadro referente ao efeito do teor resíduo no comportamento físico das argamassas de assentamento.....	112
A-A-3 Quadro referente ao efeito do teor resíduo no comportamento mecânico das argamassas de assentamento.....	115
APÊNDICE B – ANÁLISE E TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS.....	116
APÊNDICE C – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA CILAS 1064.....	131

1 INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

O processo da mudança climática, que são transformações a longo prazo nos padrões de temperatura e clima, vem se intensificando nas últimas décadas. Isso pode ser percebido pelo aumento das temperaturas médias do planeta e do nível das águas dos oceanos. O dióxido de carbono (CO₂) é responsável por mais de 80% da poluição que gera o aquecimento global. As concentrações atmosféricas de CO₂ são hoje maiores que em qualquer outro período nos últimos 420 mil anos (WWF, 2023).

De um modo geral, a indústria da construção é conhecida como uma importante fonte de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Fato é que o rápido crescimento da indústria da construção nas últimas décadas aumentou significativamente as emissões de gases com efeito de estufa, contribuindo para o aquecimento global e, consequentemente, para o aumento do nível do mar, e de acordo com estudos recentes, existe a previsão de que o nível mar, de modo geral, suba 0,25 m a 0,3 m até 2050, e 0,6 m a 1,1 m até 2100 se as emissões continuarem inabaláveis (Ting; Yi, 2023).

Se considerarmos todas as emissões de GEE geradas pelas atividades humanas, apenas a indústria cimenteira é responsável por 5%, assim como produz aproximadamente 8% das emissões globais de CO₂ (US, 2023). Quase metade destas emissões são provenientes da utilização de combustíveis fósseis, (extração, transporte dos insumos, produção de energia etc.) uma vez que o cimento Portland (CP) é um material que consome muita energia, (requerendo entre 1,11 - 1,38 MWh/t) no seu processo de fabricação; e a outra metade das emissões corresponde ao processo de descarbonatação do calcário, que liberta para a atmosfera, em média, 0,84 t de CO₂ por tonelada de clínquer produzido (Yanguatin *et al.*, 2017).

O processo de descarbonatação do calcário ocorre pela sua calcinação que é um processo fortemente endotérmico, onde o carbonato de cálcio presente no calcário é convertido, por decomposição térmica, em cal (óxido de cálcio) CaO e dióxido de carbono CO₂. A temperatura de decomposição relatada na literatura está entre 600 °C a 900 °C, dependendo do tipo de calcário. O CO₂ liberado se difunde através da camada porosa até a superfície e por convecção é liberado no calcinador (Mikulčić *et al.*, 2012). O dióxido de carbono (CO₂) é um subproduto desta reação, sendo geralmente emitido para a atmosfera (Engelhardt; Engelhardt, 2019).

Nesse cenário, o aumento global da emissão de CO₂ para atmosfera e o seu impacto associado ao aquecimento global vêm despertando em parte da comunidade acadêmica o

interesse por novos estudos que buscam investigar a (re)utilização de materiais alternativos para serem substitutos parciais ou completos do Cimento Portland (CP) como aglomerantes na preparação de concreto e argamassa. Em harmonia com esse ponto de vista, prevê-se ainda, uma redução significativa no potencial de aquecimento global¹ quando materiais de baixo carbono², são usados para substituir o Cimento Portland como aglomerantes na preparação de concretos e argamassas (Mohamed *et al.*, 2023).

Nessa mesma linha de raciocínio, vemos que, atualmente, proteger o meio ambiente vem se tornando uma das maiores preocupações dos cientistas e pesquisadores. Os processos de produção de Cimento Portland, embora tenham melhorado consideravelmente no que diz respeito ao meio ambiente, ainda são poluentes. A produção de cimento deverá ser reduzida pela utilização de outros materiais menos poluentes, ou poderá ser necessário tentar substituir os produtos cimentícios pela reciclagem de ecoprodutos³ ou resíduos para a produção de concreto e argamassas de elevado desempenho (Clausell *et al.*, 2020).

Além disso, sabemos que os resíduos acompanham todas as atividades humanas, especialmente as industriais (Bonczyk; Rubin, 2022). A reutilização de vários resíduos, que constituem um sério problema ambiental, também vem se tornando objeto de estudo em diversas pesquisas recentes. Dentre elas, estão estudos sobre resíduos de beneficiamento do Caulim (como metacaulim) incorporados em matrizes de cimento. Devido a sua alta atividade pozolânica, a inclusão de metacaulim (MK) potencializa as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto (Khatib; Clay, 2004).

Por outro lado, a gestão de resíduos é um grande desafio ambiental à escala global. Carmo *et al.* (2020) estimam que em 2016, em todo o planeta foi gerado dois bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, residenciais, institucionais e comerciais. No entanto, a geração de resíduos pela indústria da mineração estaria subestimada, podendo ser 50 vezes maior em termos de volume anual, o que representa imensos riscos e responsabilidades ambientais. Segundo eles, o maior produtor global de resíduos é a indústria mineral.

Por outro lado, a rápida expansão da urbanização e o avanço da industrialização mundial nas últimas décadas têm provocado um aumento significativo no consumo de recurso naturais

¹ Cada gás de efeito estufa é capaz de reter calor em determinada intensidade, sendo que tal capacidade pode ser comparada à capacidade do CO₂ de realizar a mesma função. Essa relação pode ser expressa através do potencial de aquecimento global de cada gás, ou GWP (Global Warming Potential, em inglês).

² Em Gouvello Filho (2010) encontramos um amplo estudo sobre a expressão “baixo carbono” que, em outras palavras, envolve a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), que são os principais contribuintes para as mudanças climáticas.

³ Segundo Jardim e Pavan (2014), *ecoprodutos* são “produtos comerciais que não agridem a natureza” ou “destinados a atender a demanda dos consumidores ‘verdes’, que estão dispostos a pagar mais por produtos ecologicamente corretos”.

não-renováveis e na geração de resíduos, tanto na indústria em geral quanto na construção civil, trazendo como consequência problemas ambientais (Akhtar *et al.*, 2022). Essa tendência é ainda impulsionada pela busca por maior produtividade e pela crescente demanda do mercado global. Esse fenômeno resulta em diversos desafios ambientais e socioeconômicos, tais como o aumento da geração de resíduos (Gubina *et al.*, 2021), uso intensivo de recursos naturais (Dubiński, 2013), problemas de deposição de resíduos (Carmo *et al.*, 2020), necessidade de soluções sustentáveis (Torquato, 2022), de regulamentação e conscientização, de inovação e economia circular (FGV, 2022), entre outros.

Nesse contexto, o setor mineral (SM) brasileiro é visto como um segmento importante para a economia nacional em virtude de o Brasil possuir vastas reservas e estar bem-posicionado no comércio mundial de *commodities* minerais. Assim sendo, o setor mineral tem se mostrado bastante promissor com crescimento constante e uma receita bruta totalizando 120 bilhões de reais no primeiro semestre de 2023, representando um aumento de 6% em relação ao mesmo período de 2022, excluindo petróleo e gás. Esse resultado sugere que outros minerais estão desempenhando um papel importante na economia do país. Além disso, a arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM) também aumentou, totalizando R\$ 3,41 bilhões, um aumento de 1,9% em comparação com o primeiro semestre de 2022. Esses indicadores demonstram que esse setor está contribuindo mais para a economia através dos impostos pagos pela exploração mineral (IBRAM, 2023).

Tal é a importância desse setor para a economia nacional nos anos de 2019 e 2020 que a estimativa da participação do SM brasileiro no produto interno bruto (PIB) do país foi de 3,190% e 3,182%, respectivamente. Em 2019, a indústria extractiva mineral (IEM) correspondeu a 1,257% do PIB brasileiro e a indústria da transformação mineral (ITM), 1,933%. Em 2020, esses valores foram de 1,293% e 1,889% (Santos, 2021).

Por outro lado, Bonczyk e Rubin (2022) alertam que em todo o mundo, milhões de toneladas de resíduos inorgânicos são produzidos diariamente na mineração, no processamento de minerais e nas atividades industriais. Tais resíduos têm sido frequentemente descartados em aterros sanitários e, muitas vezes, despejados diretamente nos ecossistemas sem o devido tratamento (Zhang, 2020).

O descarte inadequado de resíduos inorgânicos, como metais pesados e produtos químicos tóxicos em aterros sanitários ou diretamente nos ecossistemas tem potencial de causar poluição do solo, da água e do ar. Isso também pode resultar na manipulação de ecossistemas naturais, afetando a fauna e a flora. A contaminação dos mananciais de água e do solo, causada

pela exposição a resíduos inorgânicos tóxicos pode levar as pessoas à ingestão de substâncias nocivas à saúde acarretando risco para a saúde humana (Abdel-Shafy; Mansour, 2018).

1.2. Justificativa

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil (Brasil, 2010). Essa legislação foi um marco importante na gestão ambiental do país, buscando estabelecer diretrizes e regulamentações para o manejo correto dos resíduos sólidos. Entre os principais objetivos da PNRS estão a promoção da gestão integrada e do manejo sustentável dos resíduos sólidos, a redução dos impactos ambientais, o estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo, além da responsabilidade compartilhada entre setor público, setor privado e sociedade civil na gestão dos resíduos. A lei prevê ainda a implementação de instrumentos como a coleta seletiva, logística reversa⁴, incentivos à reciclagem, compostagem, entre outras práticas voltadas para a redução, reutilização, reciclagem e destinação ambientalmente adequada dos resíduos (Pimenta, 2021).

A falta de recursos financeiros e a dificuldade de coordenação de diferentes agências governamentais se apresentam ainda como os principais obstáculos à implementação da PNRS, apesar da Lei em questão catalisar alguns avanços gerais. Além do desafio em si de obter os recursos financeiros e tecnológicos necessários para a gestão de imensos volumes de resíduos de mineração ao longo de décadas ou séculos, o alto risco socioambiental (e seus correspondentes custos de longo prazo) da associação espacial entre áreas de megadiversidade e locais de mineração também devem ser considerados. Este cenário também é preocupante devido às lacunas no conhecimento sobre o volume de material depositado nas pilhas de despejo e sobre o comportamento biogeoquímico de muitos elementos tóxicos presentes nos rejeitos de mineração (Carmo *et al.*, 2020).

Ao falar a respeito da geração de resíduos, trazemos para o cerne dessa discussão a afirmação que, diferentemente dos demais setores econômicos, a mineração é observada de forma diferenciada quando relacionada à questão ambiental, pois as substâncias minerais são recursos naturais não renováveis e incorporados no processo produtivo (IPEA, 2012). Por outro lado, além dos resíduos produzidos na extração (o estéril), existem os que são gerados durante o beneficiamento (os rejeitos) e os provenientes de outros processos resultantes da operação das

⁴ Sistema que responsabiliza fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes pelo destino adequado de produtos e embalagens pós-consumo.

plantas de mineração, como os esgotos das estações de tratamento, pneus e baterias utilizadas nos veículos (IPEA, 2012).

O problema dos resíduos sólidos gerados pela atividade minerária é de extrema importância devido à sua significativa quantidade e potencial impacto ambiental, como por exemplo, a disposição em pilhas de despejo, que representa cerca de 70% da massa total de resíduos sólidos gerados por esse tipo de atividade e o volume expressivo de 3,6 bilhões de toneladas de resíduos sólidos de mineração descartados em lixões no Brasil entre 2008 e 2019. Esse volume representa 62% da massa global de minerais não combustíveis removidos da crosta do planeta em 2006 (Carmo *et al.*, 2020).

Nesse contexto, surge a demanda por produtos minerais de diversas composições, dentre eles os não metálicos, como o caulim. A exploração desse mineral tornou-se tão significativa que em 2017, a produção mundial foi de 36,6 milhões de toneladas (Mt), com um incremento de 4,3% em relação ao ano anterior, tendo como líder mundial desse mercado os Estados Unidos, com extração de 5,5 Mt, seguido pela Alemanha (4,3 Mt), Índia (4,1 Mt), República Tcheca (3,5 Mt), com o Brasil aparecendo na 8^a colocação, com 1,77 Mt (Almeida; Alves, 2021).

Devido à demanda gigantesca, a indústria da extração e beneficiamento do caulim⁵ passa a produzir grandes quantidades de rejeito, impondo desafios econômico e ambiental às empresas do setor, quanto à destinação destes subprodutos. Por isso, surgem estudos com foco no reaproveitamento dos rejeitos em produtos destinados à construção civil como: Viveiros (2017) que trata sobre “Rejeito do minério de manganês como material de construção civil” onde estudou aplicações viáveis para o aproveitamento do rejeito de manganês como material de construção civil como filler no cimento Portland, concluindo que o aproveitamento deste rejeito se torna viável do ponto de vista técnico e ambiental.

Chaves (2018) que trata sobre “Argamassa autonivelante com adição mineral (filler) de resíduo de beneficiamento de mármore e granito”, onde estuda o resíduo produzido na fase de polimento das chapas de mármore e granito, e sua incorporação à indústria da construção civil como um material alternativo para produção de concretos e argamassas, contribuindo para o desempenho técnico, viabilidade econômica e ambiental, onde concluiu que o resíduo pode ser

⁵ Para se obter o caulim, é necessário se proceder com a remoção da camada estéril e a extração do minério bruto, que será direcionado até a usina de beneficiamento. O caulim no estado bruto passa por várias etapas de beneficiamento, visando atender às especificações do mercado consumidor. Nesse processo, inevitavelmente, é gerado grande volume de rejeitos sólidos, considerado sem valor comercial e com a presença de contaminantes que, para evitar custo adicional com transportes, são depositados em regiões próximas, geralmente ao ar livre (Spacov, 2018).

utilizado como um material alternativo em substituição ao aditivo modificador de viscosidade, que é um produto caro e de difícil acesso em Belém/PA. E Aguiar Neto, (2020) que tratou da “Produção de argamassas com aproveitamento de resíduos de polímeros etilenos e propilenos como materiais de construção civil”, onde buscou-se avaliar o aproveitamento de resíduos de polímeros etilenos e propilenos como materiais de construção civil, sendo que tais resíduos plásticos foram inseridos na produção de argamassas cimentícias, seja por substituição de percentuais do agregado miúdo natural ou do cimento Portland, onde concluiu que os resíduos podem ser aproveitados por substituição parcial do cimento Portland ou do agregado miúdo.

Para se ter ideia de quanto se produz de rejeito de caulim no Brasil, Mártires (2009) apresenta uma tabela onde exibe valores da evolução da produção bruta e beneficiada de caulim no Brasil, entre os anos 1995 e 2008. Nela é demonstrado que em 1995, o Brasil extraiu 1.950t e obteve 1.067t de matéria beneficiada. Já em 2008, esses valores eram de 6.600t e 2.580t respectivamente. Se fizermos uma média da extração e produção de caulim nesse período, temos como resultado que o Brasil extraiu anualmente em média 4.246t, dos quais 1.864t tornaram-se matéria beneficiada, com 2.382t de rejeito ou foi perdida no processo. O que dá para inferir que, da matéria extraída, 44% tornam-se o caulim beneficiado com fins comerciais, e 56 %, rejeito de caulim, que são os materiais sem uso econômico.

Corroborando com essa informação, Bloodworth e Wrighton (2009) ainda são mais enfáticos ao afirmarem que a cada tonelada de caulim comercializável recuperada normalmente, produz-se até 9 toneladas de outros materiais, compreendendo aproximadamente 4 toneladas de areia, 3 toneladas de rocha, 1 tonelada de estéril e 1 tonelada de resíduos.

Por sua vez, o modelo construtivo mais popularmente utilizado no Brasil é a alvenaria convencional (não estrutural), caracterizado pela utilização de bloco cerâmico separados por juntas preenchidas por argamassas (para assentamento). Essa argamassa, como preenchimento das juntas, se torna parte essencial no sistema construtivo e responsável por fornecer características às estruturas construídas, que propiciam aos usuários boas condições de estanqueidade, confortos térmicos, acústico, entre outras.

Pesquisas com foco na utilização do rejeito de caulim na engenharia civil vem se desenvolvendo, intensificando e tomando várias nuances. Existem diversas pesquisas em torno da utilização do rejeito de caulim em concreto, assim como em argamassa de revestimento, nesse último caso temos a pesquisa de Silva (2024) da qual fui colaborador. Para ampliar esse leque, essa pesquisa visa desenvolver estudo que aborde a utilização do rejeito de caulim especificamente em argamassas destinadas ao assentamento de blocos para alvenaria convencional.

Dito isso, a presente pesquisa teve como proposta contribuir com o estudo do reaproveitamento do rejeito de caulim. Para tanto, trouxemos ao bojo do projeto, a pergunta: “*Em que medida, o rejeito de caulim calcinado à 600°C, afetará o comportamento da argamassa de assentamento de blocos cerâmicos de alvenaria convencional?*”.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos geral e específicos.

Estudar os efeitos da substituição parcial do cimento Portland composto por rejeito de caulim calcinado à 600°C em argamassas de assentamento, avaliando as propriedades no estado fresco e endurecido e analisar as propriedades físicas e mecânicas.

1.4 Estrutura da Dissertação

O desenvolvimento desse trabalho se deu em cinco capítulos, conforme apresentado na sequência.

Uma introdução com abordagem de questões referentes às considerações iniciais, justificativa e importância da pesquisa. Nas considerações iniciais é tratado sobre o processo da mudança climática, relativo às transformações a longo prazo nos padrões de temperatura e clima, em que o dióxido de carbono (CO₂) é responsável por mais de 80% da poluição que gera o aquecimento global. Entre outros produtos manipulados pelo homem, a produção de cimento Portland, por ser produzido por um processo fortemente endotérmico, é gerador de dióxido de carbono CO₂. A pesquisa bibliográfica proporcionou a identificação de pesquisas realizadas que buscam inserir a (re)utilização de materiais como substitutos do Cimento Portland (CP), dada a questão da gestão de resíduos da construção civil ser um grande desafio ambiental em escala global. Mostrou-se ainda que na geração de resíduos, a mineração é observada de forma diferenciada, pois trabalha com recursos naturais não renováveis incorporados no processo produtivo, tendo em vista que a cada tonelada de caulim comercializado, são produzidas até nove toneladas de outros materiais.

O segundo capítulo inicia apresentando as reservas brasileiras e paraenses de caulim e os impactos na produção desse minério no estado do Pará e no país. Foi tratado ainda acerca da mineralogia, aplicação industrial do caulim, a classificação do rejeito mineral e o seu

reaproveitamento na construção civil. Foram trazidas informações sobre o Cimento Portland e suas características como a composição química, processo de hidratação e classificação, bem como foi tratado sobre as adições minerais no cimento Portland, incorporadas para melhorar suas propriedades. Por fim, discutiu-se sobre as argamassas como materiais de construção heterogéneos, abordando definições, classificação, componentes, dosagem, propriedades no estado fresco e estado endurecido, tipos de argamassas para reboco, assentamento e fixação de alvenaria e, por fim, sobre o efeito rejeito de caulim calcinado neste compósito.

O terceiro capítulo trata sobre os ensaios de caracterização dos materiais (Cimento Portland, rejeito do beneficiamento caulim calcinado, agregado miúdo, água e aditivo plastificante) utilizados na pesquisa, bem como sobre o processo de produção das argamassas com método de elaboração, dosagem, tipo e quantidades de materiais. Ainda discute a influência do RCC no comportamento físico-mecânico das argamassas de assentamento mediante a descrição do processo de elaboração da argamassa para assentamento e fixação de alvenaria. Por fim, caracteriza os ensaios realizados, trazendo descrição de como foram preparados os corpos de prova, como foram realizados os processos de cura e os ensaios dos corpos de provas das composições de argamassas.

O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões sobre o efeito do teor de rejeito de caulim na trabalhabilidade no estado fresco das argamassas de assentamento, o efeito do teor de rejeito de caulim no comportamento físico das argamassas de assentamento e o efeito do teor de RCC no comportamento mecânico das argamassas de assentamento.

O quinto capítulo finalizará o trabalho com as considerações finais e sugestões para prosseguimento da pesquisa e trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 CAULIM

Argila chinesa (*China Clay*) ou Caulim⁶ é uma argila branca derivada do mineral caulinita formada pelo intemperismo hidrotérmico de rochas ígneas como o granito. É um mineral comum, no entanto, raramente ocorre em grandes depósitos de alto teor e pouca impurezas. (WA Kaolin, 2020). Para Luz *et al.* (2008) o termo caulim pode ser empregado para denominar tanto a rocha que contém a caulinita, como o seu principal constituinte, quanto para o produto resultante do seu beneficiamento.

As reservas mundiais de caulim são abundantes e amplas em todos os continentes. Nesse contexto, apenas 4 países detêm 95% de um total estimado de aproximadamente 15 bilhões de t: Estados Unidos (53%), Brasil (28%), Ucrânia (7%) e Índia (7%) (Mártires, 2009). Logo para Farias (2009), não existem fontes estatísticas de referência quanto às quantidades, afirmando que se destacam pelo tamanho e qualidade do caulim os depósitos de caulim secundário⁷ (sedimentar) encontrados nos Estados Unidos e no Brasil e de caulim primário⁸ localizados no sudoeste da Inglaterra (Farias, 2009).

2.1.1 Caulim no Brasil

As reservas brasileiras de caulim são consideradas de altíssima alvura e pureza, e qualidade internacional para uso na indústria de papéis especiais. O país já esteve em uma posição de maior relevância na indústria global de caulim, mas recentemente várias de suas minas foram fechadas. Entretanto, ainda é o detentor de reservas significativas, que é muito importante para a economia nacional, pois o mercado global continua em desenvolvimento. De acordo com a última divulgação oficial das reservas brasileiras de caulim realizada em 2010,

⁶ O caulim é considerado um mineral industrial com características especiais, dentre as quais apresenta-se quimicamente inerte em uma ampla faixa de pH, é macio e pouco abrasivo, possui cor branca, apresenta ótimo poder de cobertura quando usado como pigmento ou como extensor em aplicações de cobertura e carga, possui baixas condutividades de calor e eletricidade e seu custo é mais baixo que a maioria dos materiais concorrentes (Mártires, 2009).

⁷ Os caulinos secundários são formados pela deposição de sedimentos em ambientes lacustres, lagunares ou deltaicos. As diferentes origens geológicas do caulim resultam em diferenças notáveis na composição mineralógica (Luz, 2008).

⁸ Os caulinos primários são resultantes da alteração de rochas *in situ*, devido principalmente, à circulação de fluidos quentes provenientes do interior da crosta, da ação de emanações vulcânicas ácidas ou da hidratação de um silicato anidro de alumínio, seguida da remoção de álcalis (Luz, 2008).

este minério está distribuído em 17 estados da seguinte forma: reservas medidas de 5.747,5 Mt., reservas indicadas de 3.669,1 Mt e reservas inferidas de 2.116,5 Mt.⁹, conforme a Tabela 01.

Tabela 01 – Reservas de Caulim no ano de 2010. (milhões de toneladas - Mt)

Estado	Reserva Medida (Mt)	Reserva Indicada (Mt)	Reserva Inferida (Mt)	Total Reservas (Mt)
AM	2.669,0	2.186,0	1.349,0	6.204,0
PI	754,3	337,9	448,3	1.540,5
RN	729,0	249,6	-	978,6
AP	581,0	274,6	-	855,6
PA	335,8	283,8	147,6	767,2
RJ	224,4	28,8	-	253,2
PB	217,7	216,3	64,7	498,7
SC	85,3	19,7	5,2	110,2
SP	35,2	19,7	20,3	75,2
ES	25,0	-	-	25,0
RS	22,5	17,3	8,9	48,7
MA	2,2	0,3	-	2,5
PR	21,2	12,9	24,9	59,0
GO	20,7	10,7	43,7	75,1
MG	15,0	9,0	1,4	25,4
BA	7,3	2,7	2,7	12,7
PE	1,8	-	-	1,8
BRASIL	5.747,4	3.669,3	2.116,7	11.533,4

Fonte: Adaptado de Brasil, 2023.

Ao analisarmos os dados contidos na tabela da MME, podemos evidenciar que o estado do Amazonas é o detentor das maiores reservas de Caulim no Brasil 53,7% do total, sendo elas medidas, indicadas e inferidas, seguido dos estados do Piauí e do Rio Grande do Norte, com 13,3% e 8,4% respectivamente. Tais reservas colocaram o Brasil, no ano de 2021, entre os principais países com reservas de caulim (Brasil, 2023).

2.1.2 Produção de Caulim no Brasil

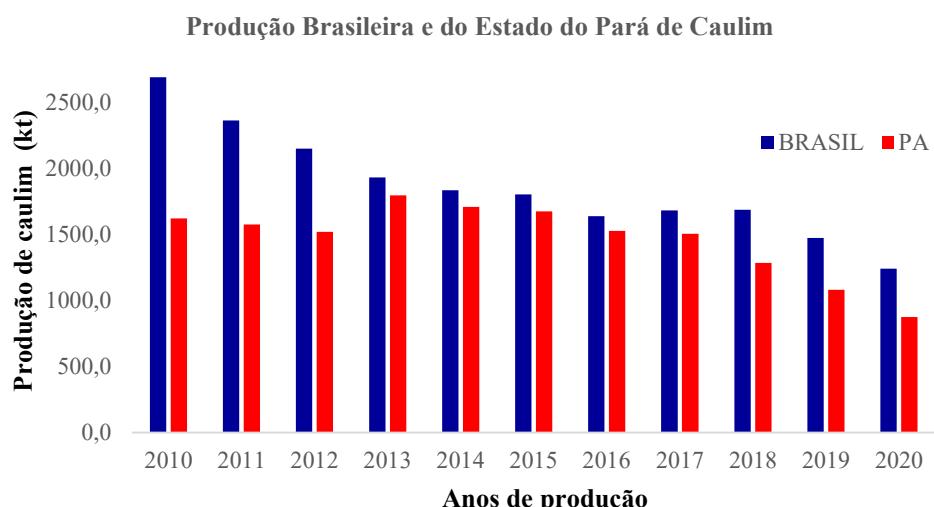
A produção de caulim no Brasil está concentrada em três empresas: Imerys Rio Capim (IRCC), Caulim da Amazônia (CADAM) e Pará Pigmentos (PPSA), e a Europa é a maior consumidora, visto que importa cerca de 45% da produção nacional. A indústria de papel revestido é a principal consumidora do caulim brasileiro (Luz *et al.*, 2008).

A Figura 01 demonstra a grande relevância do estado do Pará na produção nacional de caulim. Entre os anos de 2013 a 2017, a participação foi acima de 90% de toda a produção no

⁹ Em 2020, com base nos dados do Ministério de Minas e Energia (MME), as reservas medidas de caulim no Brasil foram estimadas, em 7.164 Mt (Brasil, 2023).

País. Ao mesmo tempo, entre 2012 e 2020, essa produção sempre se manteve acima dos 70% da produção brasileira em kt (ver Figura 01).

Figura 01 – Comparativo da produção brasileira e paraense de caulim entre os anos de 2010 a 2020 (em kt).



Fonte: Adaptado de Brasil, 2023.

2.1.3 Mineralogia

Dados relacionados à mineralogia do caulim informam que se trata de um material composto principalmente por caulinita e um silicato de alumínio hidratado, com uma fórmula estrutural de $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ (Luz *et al.*, 2008). Por sua vez, a caulinita é um filossilicato (argilo-mineral) com uma composição teórica de 39,50% de Al_2O_3 , 46,54% de SiO_2 e 13,96% de H_2O , mas pequenas variações na sua composição podem ocorrer.

É possível que outros minerais com composição semelhante a caulinita, como haloisita- $4\text{H}_2\text{O}$, haloisita- $2\text{H}_2\text{O}$, metahaloisita, diquita e nacrita, ocorram no mesmo depósito. Estes minerais possuem diferenças estruturais importantes, apesar da similaridade química. Visto, a haloisita e a metahaloisita são variedades polimorfas da caulinita, que possuem sistemas cristalinos distintos. A haloisita pode ocorrer associada à caulinita e pode ser identificada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) ou de transmissão (MET).

A presença de minerais secundários como quartzo, cristobalita, alunita, esmectita, ilita, moscovita, biotita, clorita, gibbsita, feldspato, anatásio, pirita e haloisita pode afetar negativamente a qualidade do caulim, prejudicando suas propriedades, como a cor, a brancura, a viscosidade e a abrasividade. Isso pode torná-lo inadequado para algumas aplicações, como o revestimento de papel (Luz *et al.*, 2008).

2.1.4 Aplicação do Caulim

O caulim é conhecido por suas características únicas, tornando-o um material versátil e amplamente utilizado em vários setores industriais, incluindo papel, cerâmica, farmacêutico, cosmético, tintas e aditivos alimentares. Além disso, sua “inerteza” química e neutralidade de cor, bem como sua alta cobertura e baixas condutividades térmicas e elétricas, tornam o caulim uma escolha popular em várias aplicações.

O caulim é utilizado em diversas aplicações, incluindo a fabricação de papel para melhorar sua opacidade e resistência à umidade; é usado como um componente básico na produção de cerâmica, porcelana e louças sanitárias; utilizado como um aditivo alimentar para melhorar a textura e a consistência de diversos alimentos; excipiente em diversos medicamentos, como comprimidos e cápsulas; como um ingrediente em produtos de cuidado da pele e cabelo, como cremes, loções e pós faciais; como um ingrediente na fabricação de tintas para melhorar sua resistência à água e ao desgaste (Bloodworth *et al.*, 2009).

2.1.5 Do Caulim ao rejeito mineral e seu reaproveitamento

Após a extração, o produto bruto precisa ser processado industrialmente para se tornar matéria-prima para a produção de outros produtos. A finalidade do beneficiamento do caulim é separar o minério das impurezas, como óxidos de ferro e titânio, mica e feldspato, que afetam sua cor e brancura e comprometem sua qualidade (Mártires, 2009).

O processo de beneficiamento do caulim é uma das principais causas de impactos ambientais, devido à queima de florestas nativas em fornos e à geração de milhares de toneladas de resíduo processado, também conhecido como rejeitos de produção, que é material inerte e granulado retido na peneiração do caulim, representando 80% da extração total (Barbosa *et al.*, 2016). De acordo com De Oliveira Lima (2010), cerca de 1100 toneladas desse tipo de resíduo são descartadas por mês apenas na cidade de Equador-RN, sem qualquer critério, dispostos diretamente na natureza, em aterros a céu aberto ou próximo ao local de geração

2.1.6 Classificação do rejeito mineral

A gestão adequada dos resíduos pode transformá-los em recursos valiosos. O reaproveitamento de resíduos é uma parte importante de uma economia circular, onde se busca maximizar o aproveitamento de materiais e minimizar o desperdício. Além disso, a reciclagem e a reutilização de resíduos podem economizar recursos naturais e energia, e reduzir a

necessidade de extração de novos materiais. A implementação de práticas de gestão de resíduos eficientes pode contribuir para um crescimento econômico e ambientalmente sustentável (Viana, 2021).

A classificação de resíduos é uma etapa importante para o aproveitamento destes através da reciclagem. A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos em três grupos, de acordo com suas propriedades físicas, químicas e risco de contaminação: Resíduos classe I - Perigosos; Resíduos classe II – Não perigosos, sendo subdivididos em: o Resíduos classe II A – Não inertes; o Resíduos classe II B – Inertes.

Para Sousa *et al.* (2016), a geração de resíduos é importante para o desenvolvimento, uma vez que é impossível uma sociedade se desenvolver sem os produzir. Neste contexto, se encaixam os resíduos sólidos industriais de atividades da produção de granito e caulim contendo contaminantes e classificados como classe II A, segundo a NBR 10004 de 2004.

Segue que, o trabalho de Sousa *et al.* (2016) relata a possibilidade de tratar os metais pesados e contaminantes presentes em resíduos de granito e caulim classificados como Classe II A (não-perigosos e não-inertes) através da tecnologia de estabilização por solidificação. A intenção é converter os resíduos em um material Classe II B (não-perigoso e inerte) com características ambientalmente seguras, como menor toxicidade, solubilidade e lixiviabilidade e maior integridade/durabilidade. Esta abordagem é uma alternativa para a gestão ambientalmente responsável de resíduos de construção e pode contribuir para a preservação do meio ambiente e para a saúde humana.

2.2 CIMENTO PORTLAND

O cimento tem sido o material predominante na indústria da construção e é também um dos materiais mais utilizados no mundo, ao lado da água (Santos; Andrade Neto; Ribeiro, 2021). A demanda por cimento Portland aumenta a cada dia e, portanto, a indústria cimenteira tem aumentado a produção de cimento. Entretanto, a pegada de emissão de CO₂ no ambiente deve-se principalmente à produção de cimento, porque a indústria cimenteira emite em torno de 850 kg de CO₂ por tonelada de clínquer (Raghav *et al.*, 2021).

O cimento Portland pode ser caracterizado por ser um material pulverulento, onde suas partículas variam entre 1 µm e 100 µm, seus principais componentes são silicatos e aluminatos de cálcio, juntamente com sulfato de cálcio e, quando essa mistura é combinada com água, ocorre um processo de hidratação, no qual compostos hidratados são formados. A capacidade do cimento Portland de endurecer e se tornar um material resistente é fundamental na

construção de estruturas como edifícios, pontes, estradas e diversas outras obras civis. Sua plasticidade e trabalhabilidade permitem que seja moldado em diferentes formas antes de endurecer, possibilitando sua aplicação em uma ampla variedade de projetos de construção (Santos; Andrade Neto; Ribeiro, 2021).

A NBR 11172 define o Cimento Portland como sendo um aglomerante hidráulico artificial, obtido pela moagem de clínquer Portland, sendo geralmente feita a adição de uma ou mais formas de sulfato de cálcio (ABNT, 1990). Por sua vez, a norma que especifica os requisitos para o recebimento de cimento Portland no Brasil, NBR 16697, define o cimento Portland como um ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual são adicionados, durante a fabricação, o sulfato de cálcio e outras adições minerais necessários, dentro dos limites estabelecidos pela norma (ABNT, 2018).

Por outro lado, A ASTM¹⁰ C 150 que é uma norma que define cimento Portland como um tipo de cimento hidráulico produzido a partir da moagem de clínquer. Ele é composto essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, e geralmente contém uma ou mais formas de sulfato de cálcio como adição. O clínquer é produzido a partir da queima de uma mistura de matérias-primas, como argila, cal e outros materiais, a altas temperaturas. Depois de resfriado e moído, o clínquer é misturado com gesso e outros aditivos, para produzir o cimento Portland (Mehta; Monteiro, 2008).

O cimento Portland é amplamente utilizado na construção civil devido às suas excelentes propriedades mecânicas, como a capacidade de endurecer rapidamente e de formar uma estrutura sólida e resistente. Além disso, o cimento Portland é resistente à água e ao tempo, o que o torna ideal para a construção de estruturas que precisam ser duráveis e resistentes a condições climáticas adversas. A combinação de alta resistência, durabilidade e facilidade de uso faz do cimento Portland um dos materiais de construção mais importantes e amplamente utilizados em todo o mundo (Ting; Yi, 2023).

De acordo com Callister (2020), o cimento Portland é considerado um cimento hidráulico porque sua dureza é desenvolvida por meio de reações químicas com a água. É amplamente utilizado em argamassas e concreto para aglutinar agregados de partículas inertes como areia e brita, formando uma massa contínua. O uso do cimento Portland em combinação com agregados e água permite que seja produzido um material sólido e resistente, que é usado

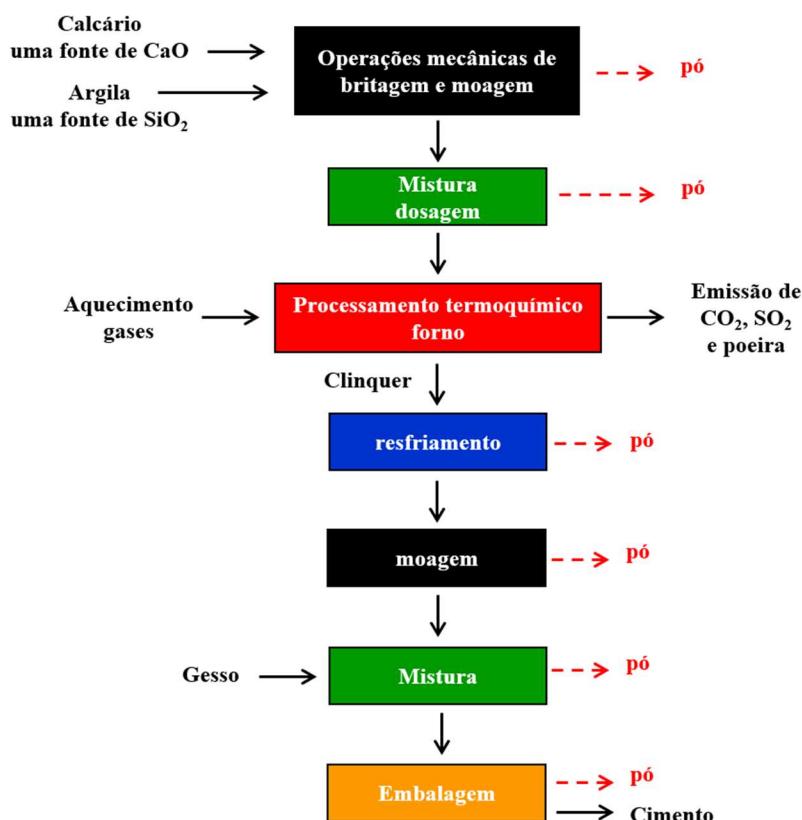
¹⁰ A ASTM International, anteriormente conhecida como *American Society for Testing and Materials*, é uma organização internacional de padrões que desenvolve e publica padrões técnicos de consenso voluntário para uma ampla gama de materiais, produtos, sistemas e serviços.

em uma ampla variedade de aplicações na construção civil, desde fundações de edifícios até estruturas de pontes e barragens (Callister, 2020).

2.2.1 Composição Química

A produção do cimento Portland envolve a mistura de argila e calcário em proporções adequadas, onde essa mistura é triturada e aquecida a cerca de 1450 °C (Nuhu *et al.*, 2020). Durante esse processo, ocorre a liberação de água e dióxido de carbono, seguida de outras reações entre os sólidos, incluindo a fusão parcial da mistura. Esse processo é conhecido como calcinação e é crucial para a produção de clínquer, que é o componente principal do cimento Portland (ver Figura 02). Após a calcinação, o clínquer é moído em pó fino, misturado com pequenas quantidades de adições, como gesso, e embalado para distribuição e uso na construção civil (Melo, 2012 e Arnesen; Glennerster, 2023).

Figura 02 - Diagrama de blocos do processo de fabricação de cimento Portland.



Fonte: Al-Jabari, 2022.

Os componentes do clínquer incluindo cálcio, silício, alumínio e ferro são misturados em proporções adequadas e passam por processos químicos para formar silicatos e aluminatos, que são os principais componentes do cimento Portland. Eles incluem silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) (Neville, 2016; Al-Jabari, 2022).

2.2.2 Hidratação do Cimento

Ao ser misturado com água, o cimento sofre uma série de reações de hidratação produzindo vários produtos de hidratação que criam a propriedade de ligação dentro da pasta de cimento resultante. Os hidratos de silicato de cálcio resultantes são estáveis em água e geram a característica adesiva ou de cimentação. A reatividade com a água e a estabilidade da água do produto de hidratação estão por trás do termo “cimento hidráulico” (Al-Jabari, 2022).

Em geral, o silicato tricálcico e os silicatos dicálcicos são os principais contribuintes para a resistência final do compósito de cimento. O aluminato tricálcico hidrata mais rápido que os silicatos tri e dicálcicos e gera uma grande quantidade inicial de calor que potencializa as reações do cimento; no entanto, não contribui significativamente para a resistência do concreto. A aluminoferrita tetracálcica é adicionada apenas para fins de fabricação de cimento (ou seja, para reduzir a temperatura necessária do forno), e não para fins de concreto. É também a fonte da coloração do cimento (cinza). O gesso é adicionado para controlar as taxas de reação inicial do cimento (tempo de pega) (Al-Jabari, 2022).

De acordo Ramachandran e Beaudoin (2000), a hidratação dos componentes do cimento Portland acontece de forma sequencial, com a hidratação do aluminato tricálcico (C_3A) sendo a primeira a ocorrer, seguida pelo silicato tricálcico (C_3S) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), e finalmente pelo silicato dicálcico (C_2S). Além disso, o gesso e outras fases de sulfato de cálcio presentes são rapidamente consumidos nas primeiras 24 horas de reação.

Isso significa que a hidratação começa com a reação do aluminato tricálcico (C_3A) com a água, seguida pelo silicato tricálcico (C_3S), depois pelo ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) e por último pelo silicato dicálcico (C_2S). A hidratação do gesso e outras fases de sulfato de cálcio é concluída em poucas horas após o início da reação. Durante a hidratação, o gel C-S-H e a portlandita são formados, o que ajuda a aumentar a coesão e a resistência da pasta de cimento.

2.2.3 Classificação do Cimento Portland

As classificações dos cimentos são baseadas na performance e na composição química, mas em alguns casos, um mesmo tipo de cimento pode ter várias composições similares. No entanto, mesmo que as composições sejam similares, a performance do cimento pode variar de acordo com as adições e as condições de fabricação. Portanto, é importante escolher o tipo de cimento adequado para o seu uso, considerando suas necessidades específicas em termos de resistência, velocidade de endurecimento, entre outras características (Neville, 2016).

Tabela 02 – Designação normalizada, siglas e classes de resistência do Cimento Portland.

Designação normalizada (Tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 ^c	
	Não estrutural	CPB	-	-

a. O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3 além dos requisitos para seu tipo e classe originais.
 b. O Sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.
 c. As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (Mpa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.
 d. Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 Mpa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte: Adaptado da NBR 16697 (ABNT, 2018)

No Brasil, existem vários tipos de cimento Portland produzidos, com diferentes composições e características. Os tipos mais comuns usados na construção civil incluem o Cimento Portland Comum, o Cimento Portland Composto, o Cimento Portland de Alto-forno e o Cimento Portland Pozolânico. Além disso, existem outros tipos de cimento menos comuns, como o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, o Cimento Portland Resistente aos Sulfatos, o Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação, o Cimento Portland Branco e o Cimento para Poços Petrolíferos, usados para aplicações específicas. Todos os tipos de cimento mencionados são regulados por normas da ABNT, que estabelecem as especificações e requisitos para sua produção e uso.

A NBR 16697 (ABNT, 2018) é uma fonte importante para a garantia da qualidade dos cimentos produzidos no Brasil, e fornece uma base comum para a comparação dos diferentes tipos de cimento disponíveis no mercado.

Os cimentos Portland são identificados por siglas, seguidas de sua classe de resistência (25, 32, 40 ou ARI), que representam a capacidade de resistir à compressão. Adicionalmente, as siglas “RS” e “BC” podem ser acrescentadas para indicar que o cimento é resistente a sulfatos ou tem baixo calor de hidratação, respectivamente conforme apresentado na Tabela 02. Essa identificação permite aos profissionais e consumidores determinar as propriedades específicas do cimento e se ele é adequado para o uso em questão (NBR 16697, 2018).

Tabela 03 – Limites de composição do Cimento Portland (porcentagem de massa).

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + Sulfato de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
Cimento Portland comum	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 - 5		
	CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z			71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25
Cimento Portland de alto forno	CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Cimento Portland pozolânico	CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V ^a	ARI		90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Portland branco	Estrutural	25, 32 ou 40	CPB	75 – 100	-	-	0 – 25
	Não estrutural			-	50 – 74	-	26 – 50

^a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI-RS), podem ser adicionadas escória granulada de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Fonte: Adaptado da NBR 16697 (ABNT, 2018)

A NBR 16697 (ABNT, 2018) também especifica os requisitos para o cimento Portland, incluindo seus limites mínimos e máximos admissíveis de Clínquer + Sulfato de cálcio, Escória granulada de alto-forno, Material Pozolânico e Material Carbonático, na composição de cada tipo de cimento. Esses limites são estabelecidos para garantir que o cimento atenda aos padrões de qualidade e desempenho adequados para a sua aplicação específica. A Tabela 03 fornece essas informações para ajudar na identificação e no controle da qualidade dos cimentos.

2.3 ADIÇÕES MINERAIS

As adições minerais para cimento Portland são minerais insolúveis finamente moídos ou finos adicionados à mistura de cimento Portland para melhorar suas propriedades (Bauer, 2019). Essas adições podem ser resultado de um processo industrial ou de material natural processado e são usadas para aumentar a coesão do estado fresco e a resistência mecânica, química e durabilidade do estado endurecido. Quando usadas em proporções adequadas, as adições minerais podem melhorar significativamente a performance do cimento Portland.

2.3.1 Tipos de adições minerais

A NBR 11172 (ABNT, 1990) define o termo “adição” como o produto de origem mineral adicionado a cimentos, argamassas e concretos com o objetivo de alterar suas propriedades. Por sua vez, a norma americana ASTM C 125¹¹ define aditivo ou adição como qualquer material não sendo água, agregados, cimentos hidráulicos ou fibras, usado como

¹¹ A Norma Técnica ASTM C 125 trata de terminologia padrão relativa a concreto e agregados de concreto.

ingrediente em concreto ou argamassa e adicionado à mistura imediatamente antes ou durante a sua preparação (Bauer, 2019).

Ainda de acordo com Bauer (2019) a ação físico-química, as adições minerais em cimento para concreto e argamassa são classificadas em três grupos: pozolânicos, material cimentante e filler. Cada tipo de adição tem uma ação específica e é utilizado em diferentes circunstâncias para melhorar a performance do concreto.

2.3.1.1 Adição Pozolânica

Segundo a NBR 11172 (ABNT, 1990) e NBR 12653 (ABNT, 2014) a conceituação de materiais pozolânicos é, materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, sozinho, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes.

Por sua vez a NBR 12653 (ABNT, 2014), conceitua atividade pozolânica como sendo a capacidade de determinado material de reagir com o hidróxido de cálcio em presença de água, e formar compostos com propriedades cimentícias. O material pozolânico de origem ígnea ou sedimentar, geralmente ácido, rico em materiais silicosos, são considerados “*pozolanas naturais*”, e o material com atividades pozolânica proveniente de tratamento térmico de determinadas argilas ou subprodutos industriais são consideradas “*pozolanas artificiais*”.

As pozolanas são materiais que podem ser adicionados às misturas de concreto e argamassa para melhorar suas propriedades. Eles têm duas funções principais, sendo o refinamento dos poros, onde as pozolanas podem ser utilizadas para preencher os espaços vazios entre as partículas de cimento, tornando a mistura mais compacta e, portanto, reduzindo a porosidade do concreto e argamassa contribuindo para sua durabilidade; e a reação química, onde as pozolanas reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), um subproduto da hidratação do cimento Portland, para formar novos compostos de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Esses compostos são responsáveis pela resistência mecânica do compósito e podem aumentar significativamente a resistência à compressão, melhorar a durabilidade e reduzir a permeabilidade (Christ *et al.*, 2022).

Ainda segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014) as pozolanas podem ser classificadas em três classes distintas:

- Classe N – são as pozolanas naturais e artificiais que possuam propriedades ligantes (Christ *et al.*, 2022), como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, *cherts*¹² silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
- Classe C – são cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, que possuam propriedades ligantes (Christ *et al.*, 2022).
- Classe E – pertencem a essa classe quaisquer pozolanas não contempladas nas classes N e C, mas que possuam propriedades ligantes.

Existem diferentes tipos de pozolanas, incluindo cinzas volantes, sílica ativa, metacaulim, e a cinza de casca de arroz, cada uma com propriedades únicas que podem influenciar a eficácia de sua utilização em misturas de concreto.

2.3.1.2 Adição Cimentante

As adições cimentantes são aquelas que não precisam de hidróxido de cálcio para formar um produto cimentante, mas sua auto-hidratação é lenta e a quantidade produzida não é suficiente para fins estruturais. Por isso, é comumente utilizada como adição para melhorar outras propriedades do concreto, como a resistência térmica. A adição que se enquadra neste grupo de material é a escória granulada (Bauer, 2019).

A escória granulada de alto-forno é um material de origem industrial que é gerado como subproduto da produção de ferro gusa. É composto principalmente por óxidos de cálcio, silício e alumínio e possui propriedades hidráulicas latentes quando pulverizado. Quando adicionado ao concreto, a escória granulada pode melhorar suas características, como a resistência térmica, por exemplo (NBR 11172, 1990).

2.3.1.3 Filler

O material filler é uma adição mineral usada em vários processos industriais como preenchimento, revestimento ou para melhorar as propriedades físicas de materiais. É geralmente finamente moído e pode ser feito de diferentes tipos de minerais, como sílices, alumínios, quartzo, entre outros (Irassar *et al.*, 2015).

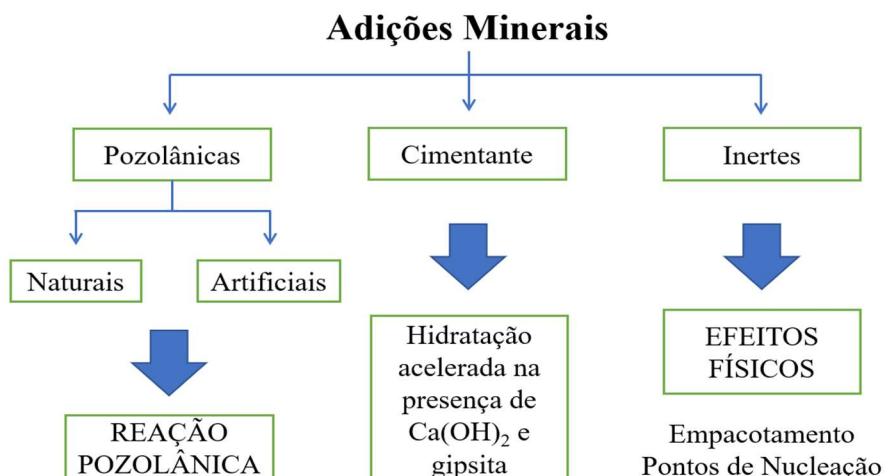
¹² Chert é uma rocha sedimentar constituída por sílica (SiO_2) microcristalina (grãos de quartzo invisíveis a olho nu), criptocristalina (grãos não visíveis ao microscópio petrográfico) ou mesmo amorfa (não cristalina). É uma rocha formada quando esqueletos silicosos de animais marinhos são acumulados e consolidados, e durante a diagênese a sílica é dissolvida e então precipitada da solução resultante. Disponível em: <<https://didatico.igc.usp.br/rochas/sedimentares/chert/>>. Acessado em: 15 Jan. 2023.

Além disso, para Bauer (2019), o filler não tem nenhum efeito químico, mas ajuda na estruturação e na hidratação dos grãos de cimento. As adições podem ser feitas a partir de rochas calcárias, graníticas e basálticas. A adição desses minerais à mistura de argamassas e concretos pode afetar o comportamento do material fresco. Pode ser necessário usar mais água para manter a trabalhabilidade, a consistência da mistura pode mudar, haver uma redução na separação dos componentes da mistura e a exsudação (perda de água para a superfície) pode ser diminuída (Bauer, 2019).

O uso do aditivo fino (filler) pode afetar a porosidade inicial da pasta de cimento, o que pode ter um impacto na quantidade de água necessária para manter a trabalhabilidade, dependendo das características específicas da mistura (Irassar *et al.*, 2015).

Na Figura 03 trazemos um resumo das ações das adições minerais presentes no cimento, apresentado por Christi *et al.* (2022).

Figura 03 – Ação das adições minerais no Cimento Portland



Fonte: Christi *et al.* (2022).

2.4 ARGAMASSAS

A descoberta do cimento teve a vantagem de permitir a fabricação de argamassas com resistência muito maior e pega rápida. As argamassas são amplamente utilizadas em todo o mundo em aplicações como revestimentos de paredes e tetos, pisos ou rejuntamentos, e até mesmo para fins estruturais, como alvenarias e argamassas pré-moldadas (Dos Santos *et al.*, 2023). As argamassas são materiais de construção heterogéneos cujos componentes que as constituem, processos de elaboração e as formas de aplicação evoluíram constantemente ao longo do tempo. O fato é que modificações aparentemente insignificantes nas proporções de

seus componentes ou em suas dosagens podem modificar suas características e seu desempenho quando em contato com a alvenaria (Arizzi; Cultrone, 2021).

2.4.1 Definições

Dado que a argamassa tem inúmeras aplicações na construção civil, existem muitas definições diferentes deste termo, embora muitas vezes com significados semelhantes. A exemplo, temos a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), que define argamassa como uma mistura homogênea de um ou mais ligantes inorgânicos, agregado miúdo e água, que pode conter fibras, aditivos ou adições minerais. A argamassa tem propriedades de aderência e endurecimento e pode ser dosada em obra ou produzida em instalações próprias (argamassa industrializada).

Em Young (2021), o termo aparece definido como materiais produzidos pela combinação de uma substância aglomerante (como cal ou cimento) ou uma combinação destes (argamassa de composição) e um agregado, que geralmente é areia, mas pode incluir alguma pedra britada. Nessa combinação a água é utilizada para tornar a argamassa plástica até que ela ganhe consistência e endureça. Ainda para esse autor, argamassa é qualquer material que se encontre em pasta úmida podendo ser utilizado para assentar alvenarias ou fazer emboço e rebocos. As argamassas geralmente consistem em ligante e agregado (Young, 2021).

Para Arizzi e Cultrone (2021), as argamassas são materiais de construção artificiais compostos por um ou mais ligantes inorgânicos, cuja principal função é unir grãos soltos por meio de diferentes transformações químicas em sua massa; um ou mais agregados (ou areias), que são adicionados para conferir estabilidade volumétrica à massa de argamassa durante a secagem e aumentar a resistência mecânica da argamassa endurecida; e água, necessária para misturar todos os componentes da argamassa até formar uma pasta viscosa.

Segundo a Associação de Desenvolvimento de Tijolos (Brick Development Association – BDA) a argamassa é uma pasta trabalhável usada para unir tijolos e outras unidades de alvenaria. Uma junta de argamassa atua como um selante, uma almofada de apoio, a cola que une as unidades, mas as mantém separadas e, nesse sentido, atua como um adesivo que preenche lacunas. Além disso, é função da argamassa vedar vãos irregulares entre as alvenarias e constituir uma barreira à passagem de umidade. A designação correta da argamassa é de vital importância para proporcionar não só resistência à construção da parede, mas também durabilidade contra a entrada de água. (BDA, 2023)

A norma ASTM C219 (comitê de cimento) define argamassa como “uma mistura de material cimentício hidráulico finamente dividido, agregado fino e água no estado não endurecido ou endurecido; argamassa hidráulica”. A definição mais simples é provavelmente a

da norma ASTM A1096/A1096M (comitê de aço, aço inoxidável e ligas relacionadas), que define argamassa como “uma mistura de cimento, agregado fino e água”. A norma ISO 6707-1 considera argamassas como “uma mistura de ligante, agregado fino e água, que endurece e que normalmente é utilizada como produto de junta”. Finalmente, a definição de argamassa das normas EN 998-1 e EN 998-2 também é bastante simples: “mistura formada por um ou mais ligantes inorgânicos, agregados, água e, por vezes, aditivos e aditivos” (Revuelta, 2021).

Além destes três componentes básicos, outros elementos secundários denominados adições e aditivos são frequentemente adicionados às argamassas para melhorar suas características ou propriedades específicas, ou para introduzir novas (Arizzi; Cultrone, 2021).

2.4.2 Classificação

A classificação das argamassas pode ser realizada levando-se em consideração seus diversos aspectos e de acordo com diferentes conceitos tais como composição, propriedades, requisitos, método de produção, método de fornecimento, aplicações, entre outros aspectos (que não é objeto desse texto).

Assim, dependendo dos materiais ligantes utilizados nas composições das argamassas, estas são classificadas em argamassas de cimento, argamassas de cal hidráulica, argamassas de cal aérea, argamassas de gesso e argamassas compostas, sendo essa última composta por diferentes ligantes misturados, por exemplo, cimento e cal (Revuelta, 2021).

Se buscarmos esse termo em Siqueira (2011), temos que as argamassas podem ser classificadas em mistas ou simples, dependendo do tipo de aglomerante usado. Argamassas mistas têm mais de um aglomerante (cimento e cal), enquanto argamassas simples são feitas apenas com um aglomerante, o cimento, por exemplo.

As argamassas ainda podem ser classificadas de acordo com seu emprego ou sua utilização na construção civil. Elas podem ser aplicadas para revestimento de paredes e tetos (NBR 13281-1), para assentamento, fixação de alvenaria (NBR 13281-2), reboco (revestimento), pavimentações, obras de reparação, impermeabilizações (Revuelta, 2021), para uso em chapisco, contrapiso, dentre outros (CEF, 2023). Todos esses termos, podem ser encontrados com melhores detalhes na NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia (ABNT, 2013).

Com relação ao documento da Caixa Econômica Federal (CEF) que traz as composições do Sistema Nacional de Pesquisas de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), encontramos 162 composições para os serviços de Argamassa, as quais encontram-se divididas por traço, utilização (alvenaria, chapisco, contrapiso, dentre outros) e tipo de preparo (mecânico

ou manual). Nesse documento, encontramos a informação que o traço indicado na composição se refere ao volume de materiais (CEF, 2023).

Carasek (2007) em seu trabalho, apresenta um quadro resumo de classificação de argamassas, contendo os critérios de classificação e o tipo de argamassa (Quadro 01) e segundo as funções na construção (Quadro 02).

Quadro 01 – Classificação das argamassas.

<i>Critério de classificação</i>	<i>Tipo</i>
Quanto à natureza do aglomerante	<ul style="list-style-type: none"> • Argamassa aérea • Argamassa hidráulica
Quanto ao tipo de aglomerante	<ul style="list-style-type: none"> • Argamassa de cal • Argamassa de cimento • Argamassa de cimento e cal • Argamassa de gesso • Argamassa de cal e gesso
Quanto ao número de aglomerante	<ul style="list-style-type: none"> • Argamassa simples • Argamassa mista
Quanto à consistência da argamassa	<ul style="list-style-type: none"> • Argamassa seca • Argamassa plástica • Argamassa fluida
Quanto à plasticidade da argamassa	<ul style="list-style-type: none"> • Argamassa pobre ou magra • Argamassa média ou cheia • Argamassa rica ou gorda
Quanto à densidade de massa da argamassa	<ul style="list-style-type: none"> • Argamassa leve • Argamassa normal • Argamassa pesada
Quanto à forma de preparo ou fornecimento	<ul style="list-style-type: none"> • Argamassa preparada em obra • Mistura semipronta para argamassa • Argamassa industrializada • Argamassa dosada em central

Fonte: Carasek, 2007.

Quadro 02 – Classificação das argamassas segundo as suas funções na construção.

<i>Função</i>	<i>Tipos</i>
Para construção de alvenarias	Argamassa de assentamento (elevação de alvenaria) Argamassa de fixação (ou encunhamento) – alv. de vedação
Para revestimento de paredes e tetos	Argamassa de chapisco Argamassa de emboço Argamassa de reboco Argamassa de camada única Argamassa para revestimento decorativo monocamada
Para revestimento de pisos	Argamassa de contrapiso Argamassa de alta resistência para piso
Para revestimentos cerâmicos (paredes/ pisos)	Argamassa de assentamento de peças cerâmicas – colante Argamassa de rejunte
Para recuperação de estruturas	Argamassa de reparo

Fonte: Carasek, 2007.

2.4.3 Componentes

A argamassa é produzida a partir da mistura de agregados, materiais cimentícios, água e aditivos e alguma adição, se necessário. As principais diferenças entre os componentes do concreto e da argamassa são os tipos de materiais cimentícios e o tamanho do agregado. Os materiais cimentícios em argamassas podem incluir vários tipos de ligantes, enquanto o concreto só pode incorporar cimento como ligante. Quanto ao tamanho, os agregados de argamassa normalmente utilizam apenas agregado fino (areia), enquanto o concreto é produzido com agregado fino e grosso (cascalho ou seixo) (Revuelta, 2021).

2.4.4 Dosagem

Diferentemente da produção do concreto, onde existe vários métodos racionais para o desenvolvimento de sua dosagem, para a argamassa não existe uma metodologia racional (amplamente utilizado) para se desenvolver sua dosagem. Essa por sua vez, se vale de uma dosagem bastante intuitiva, dependente dos sentidos e experiência do pedreiro ou mestre de obra. Em geral, a proporção dos materiais (traço) para a produção de argamassas é determinada pelo mestre da obra, sem grande interação ou acompanhamento por parte do engenheiro (De Oliveira Gomes; Neves, 2002).

Em muitas ocasiões as argamassas de cimento do final do século XIX foram especificadas para serem 1:2 ou 1:3 de cimento para areia. Isto ocorreu numa época em que os cimentos Portland eram bastante diferentes e muito mais fracos do que são hoje. Uma argamassa de cimento moderna feita com areia lavada e bem graduada nessas proporções não só será difícil de trabalhar; também será muito forte, muito frágil e bastante impermeável para a maioria dos materiais de alvenaria (Young, 2021).

A dosagem da argamassa depende do seu propósito e é baseada em normas e documentos técnicos. Para Rocha (2011) as argamassas são projetadas para suportar pressões de compressão limitadas, mas não necessariamente pressões de tensão ou cargas elevadas. Esse mesmo autor informa que os traços são pré-definidos e têm, em geral, uma relação aglomerante/areia próxima ou igual a 1:3 em volume.

No documento da Caixa Econômica Federal (CEF), “Cadernos Técnicos de Composições para Argamassas” a empresa apresenta as composições deste grupo e os divide por traço, utilização (alvenaria, chapisco, contrapiso, dentre outros) e tipo de preparo (mecânico ou manual). Nesse documento, também são apresentadas argamassas industrializadas, bem como produção e bombeamento de argamassas projetadas (CEF, 2023).

No documento da CEF, encontramos muitas composições e traços de argamassas, onde em geral, as argamassas com traços mais ricos (como 1:3, 1:4 e 1:5) são utilizadas para elementos que necessitam de maior resistência e aderência mecânica, como contrapisos e chapisco, já as argamassas com traços mais pobres (1:6, 1:7, 1:8 e 1:9) são utilizadas para comporem elementos como emboço, massa única, assentamento de alvenaria de vedação (CEF, 2023).

Uma argamassa de boa qualidade é essencial para um bom acabamento e desempenho estrutural adequado da edificação e construção. Deste ponto de vista, as argamassas apresentam dois grupos diferentes de propriedades, as das argamassas plásticas e as das argamassas endurecidas.

2.4.5 Propriedades no estado fresco

O papel das argamassas no estado fresco, durante a construção, é muito importante e complexo porque a mesma: “(a) deve espalhar-se facilmente e permanecer utilizável durante tempo suficiente para permitir a colocação precisa das unidades de alvenaria para alinhar e nivelar, (b) deve reter água para não seque e não endureça muito rapidamente, especialmente quando se utilizam unidades de alvenaria absorventes, (c) deve endurecer num tempo razoável para evitar que se deforme ou se comprima sob o peso das unidades acima colocadas” (MPA, 2023).

As propriedades plásticas definem a adequação da argamassa à construção, que por sua vez se relaciona com as propriedades da argamassa no estado endurecido. As propriedades mais importantes das argamassas em seu estado plástico, são a trabalhabilidade, a retenção de água e o teor de ar incorporado (Revuelta, 2021).

2.4.5.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade descreve a relativa facilidade com que uma argamassa, no estado fresco, pode ser transportada, misturada, espalhada, consolidada e trabalhada. Para alguns autores, não é uma propriedade única e mensurável, mas uma combinação de diversas propriedades, particularmente a consistência, plasticidade, coesão, exsudação, retenção de água e consistência (Carasek, 2007; Young, 2021).

Para Lopes (2017), trabalhabilidade está relacionada ao estado fresco da argamassa, e a determina como sendo a facilidade com que pode ser misturada, aplicada, transportada e acabada em condição homogênea. E ainda, está diretamente relacionada ao traço. Logo,

trabalhabilidade é uma combinação de várias características reológicas das argamassas (consistência, plasticidade, retenção de água, coesão, endurecimento) e por isso não é fácil de ser quantificada embora seja frequentemente correlacionada com a consistência da argamassa e facilmente percebida pelo profissional durante o manuseio.

Uma argamassa com boa trabalhabilidade proporcionará, (a) facilidade de uso, ou seja, a forma como adere ou desliza na espátula (colher); (b) facilidade de espalhamento na unidade de alvenaria (blocos e tijolos); (c) facilidade de “moldagem” entre cursos sem quedas ou manchas excessivas, e (d) facilidade de posicionamento da unidade de alvenaria sem movimento devido ao seu próprio peso e ao peso das fiadas adicionais (MPA, 2023a).

Algumas propriedades inerentes à trabalhabilidade das argamasas são resumidas por Carasek (2007) no quadro 03 a seguir.

Quadro 03 – Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas.

<i>Propriedades</i>	<i>Definição</i>
Consistência	É a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação de cargas
Plasticidade	É a propriedade pela qual a argamassa tende a conserva-se deformada após a retirada das tensões de deformação.
Retenção de água e de consistência	É a capacidade de a argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água.
Coesão	Refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas solidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante.
Exsudação	É a tendência de separação da água (pasta) da argamassa, de modo que a água sobe e os agregados descem pelo efeito da gravidade. Argamassa de consistência fluida apresentam maior tendência à exsudação.
Densidade de massa	Relação entre a massa e o volume de material.
Adesão inicial	União inicial da argamassa no estado fresco ao substrato.

Fonte: Carasek, 2007.

Figura 04 – Utilização de argamassas de assentamento em obras.



Fonte: o autor.

Embora a trabalhabilidade seja grandemente controlada pela classificação do agregado, pelas proporções dos componentes e pelo teor de ar, o ajuste definitivo à trabalhabilidade é

definido com base no teor de água. Nas argamassas de alvenaria, a capacidade de manter uma trabalhabilidade adequada depende da retenção de água e das características de pega da argamassa. Como consequência, uma boa trabalhabilidade da argamassa é essencial para uma boa aderência às unidades de alvenaria. As argamassas trabalháveis suportam o peso das unidades de alvenaria quando assentadas e facilitam o seu alinhamento (ver Figura 04-a). O pedreiro, por sua vez, pode avaliar adequadamente a trabalhabilidade observando a resposta da argamassa à colher (Figura 04-b) (Revuelta, 2021).

2.4.5.2 Retenção de água

A propriedade de retenção de água de uma argamassa é avaliada pelo seu comportamento durante a etapa de assentamento das unidades de alvenaria, e o trabalho realizado logo em seguida (Young, 2021). A propriedade de retenção de água da argamassa, está intimamente relacionada à sua trabalhabilidade. É a propriedade que a argamassa, em seu estado fresco, possui de resistir à perda de água de amassamento por absorção das unidades de alvenaria (sucção) e/ou pelo ar, em condições de variação de temperatura, vento e umidade (Revuelta, 2021; MPA, 2023a). A retenção de água não deve ser nem muito baixa nem muito alta e pode ser aumentada usando quantidades maiores de cal ou ar, e adição de partículas finas de areia dentro de limites de gradação aceitáveis, ou usando produtos de retenção de água.

Uma argamassa com boa “retenção de água” será coesa (pegajosa), e ficará facilmente aderida (pendurada) à colher de pedreiro quando virada (com a argamassa na parte de baixo da colher). Este é um aspecto importante da sua trabalhabilidade, pois além de ser plástica, a argamassa não deve se desprender do substrato ao ser espalhada, fluidez, enum perder líquido, o que poderá manchar na alvenaria pois, a água ao se separar da mistura e carrega algum ligante (Young, 2021).

Para Chen *et al.* (2020), em sua pesquisa em que estudou o efeito do éter de hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) na composição para retenção de água da argamassa de cimento, afirma que a alta retenção de água melhora a hidratação do cimento e limita a absorção da água de amassamento pelo substrato e assim confere boas propriedades mecânicas e adesivas à argamassa.

Nas argamassas de alvenaria, “uma argamassa com boa retenção de água permanece plástica durante tempo suficiente para permitir que as unidades de alvenaria sejam alinhadas e canalizadas sem quebrar a ligação íntima entre a argamassa e as unidades (Young, 2021). A perda de umidade devido à baixa retenção de água, além da perda de plasticidade, pode diminuir bastante a eficácia da ligação às unidades de alvenaria” (MPA, 2023a). Em outras palavras, a

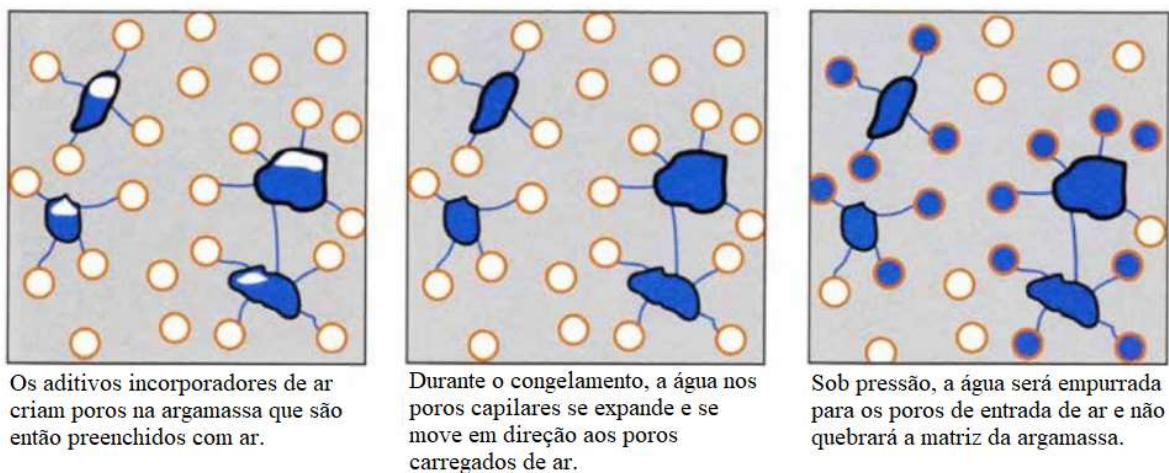
retenção de água é a capacidade das argamassas de rebocos de reter água por succção, evitando perdas dessa nos substratos com o qual esteja em contato, em que se essa for muito rápida, podem afetar a hidratação normal do cimento, diminuindo assim a resistência da argamassa e a aderência entre a argamassa e o substrato, principalmente quando a argamassa estiver em contato com superfícies relativamente permeáveis.

2.4.5.3 Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado, ou simplesmente ar incorporado, é uma medida em percentual, dos vazios formados pela entrada de ar na constituição da argamassa. Essa medida é determinada pela NBR 13278 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado). É obtida pela diferença de percentual entre os valores da densidade de massa da argamassa medida (densidade real), pelo valor da densidade de massa teórica da argamassa, sem vazios (densidade teórica), dividido pela densidade teórica (ABNT, 2005).

Para a *Mineral Products Association* (MPA), o conteúdo de ar incorporado à argamassa no seu estado fresco também é muito importante para ajudar na trabalhabilidade desse compósito. Contudo, se o teor de ar incorporado se tornar excessivo, pode resultar numa redução gradual da resistência mecânica da argamassa quando endurecida, e particularmente na aderência e na resistência à tração na flexão (MPA, 2023a). O teor de ar é útil para prever a resistência mecânica de argamassas, (Lawrence; Ringot; Husson, 1999).

Figura 05 - Funções dos aditivos incorporadores de ar.



Fonte: BDA, 2018 *apud* Revuelta, 2021.

Para as regiões geladas do planeta, essa propriedade torna-se mais importante ainda, pois se assemelha ao concreto, onde para se conseguir uma durabilidade adequada da argamassa é muito importante a existência de um teor de ar suficiente que permita suportar os ciclos de

gelo-degelo sem perturbar a matriz da argamassa. A inclusão do ar arrastado gera um grande número de bolhas dispersas, que atuam como câmaras de expansão. Assim, permitem que a água congelada se expanda sem perturbar a matriz da argamassa (ver Figura 05) (Revuelta, 2021).

2.4.6 Propriedades no estado endurecido

A argamassa de alvenaria em seu estado endurecido, tem como o seu principal objetivo na estrutura final, receber, distribuir e transferir as tensões de compressão, de tração e de cisalhamento entre as unidades da alvenaria. As propriedades das argamassas no estado endurecido que ajudam a definir o desempenho da estrutura de alvenaria incluem resistência à compressão, aderência e durabilidade entre outras propriedades. Uma boa adesão e adequação à finalidade, por exemplo, resistência às intempéries e aparência, também são essenciais em uma argamassa de reboco endurecida (Revuelta, 2021).

2.4.6.1 Resistência à Compressão

A resistência à compressão (Figura 06) da argamassa é frequentemente utilizada como principal critério para selecionar o tipo de argamassa. Isto ocorre porque a resistência à compressão é moderadamente simples de medir e está comumente relacionada a outras propriedades importantes da argamassa (tração na flexão e absorção da argamassa, por exemplo). Além disso, como os testes de resistência à compressão são relativamente fáceis de realizar e geram resultados consistentes e reproduzíveis, esta propriedade é normalmente levada em consideração como base para avaliar a compatibilidade dos ingredientes da argamassa (Revuelta, 2021).

Figura 06 – Realização do ensaio de resistência à compressão em corpo de prova prismático.



Fonte: o pesquisador.

Young (2021), ao se referir sobre “o básico” da constituição de uma boa argamassa, cita entre outros, os termos “resistência suficiente”, “não muito forte” e “ser sacrificial”, entre outros. Para o autor a argamassa deve possuir “resistência suficiente” para unir as unidades individuais de alvenaria (resistência de aderência), apoiar a alvenaria sobrejacente e a estrutura do edifício (resistência à compressão) e resistir a cargas dinâmicas, como vento e movimentos menores (tração na flexão).

Para a qualidade das argamassas de ser “não muito forte” o autor afirma que o compósito em questão deve ser sempre mais fraco que as unidades de alvenaria, pelo que qualquer fissuração que se desenvolva na parede será expressa nas juntas de argamassa onde é muito menos evidente e muito mais fácil reparar a argamassa do que substituir tijolos ou pedras. Outra característica que o autor cita é o “ser sacrificial” qualidade essa que a argamassa de assentamento deve sempre romper antes das unidades de alvenaria. Que é uma combinação dos dois pontos anteriores. Argamassas deliberadamente sacrificiais são comumente especificadas para a reparação de alvenarias danificadas por altas concentrações de sais solúveis (Young, 2021).

2.4.6.2 Aderência

A aderência é provavelmente a propriedade física mais importante da argamassa endurecida. Os requisitos gerais da NBR 13528-1 – Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração, define “aderência” como a “propriedade do revestimento de resistir às tensões atuantes na superfície ou na interface com o substrato”. E a “resistência de aderência à tração” (R_a) é definido nesta mesma norma como sendo a “tensão máxima suportada por uma área limitada de revestimento (corpo de prova) na interface de avaliação, quando submetida a um esforço ortogonal de tração” (ABNT, 2019).

A ligação de tração é a força de tração necessária para separar as unidades da argamassa e entre si. Uma boa ligação é essencial para minimizar a entrada de água e umidade através das paredes. Por outro lado, a resistência da ligação é necessária para resistir às forças de tração causadas pelo vento, pelas forças estruturais e outras aplicadas, pelo movimento das unidades de alvenaria e pelas mudanças de temperatura (Revuelta, 2021).

As unidades de alvenaria devem ter uma certa durabilidade e resistência à degradação. A argamassa deve, em princípio, cumprir os mesmos padrões apresentado pelos tijolos. A interação entre as unidades de alvenaria e a argamassa é crucial para as qualidades finais da parede. O fator mais importante é a aderência entre a unidade de alvenaria e a argamassa. A adesão deficiente sempre resulta em resistência e impermeabilidade deficientes. As unidades

de alvenaria possuem diferentes características e resistências a serem observadas. Isto implica que diferentes tipos de unidades impõem diferentes exigências às argamassas e às técnicas de trabalho. O conjunto de alvenaria e a argamassa devem ser sempre adequados entre si, tanto para permitir que o trabalho de alvenaria seja executado com suficiente cuidado, como para que a parede resista com suas boas características durante muito tempo (Sandin, 1995).

Mantendo-se iguais todos os outros fatores, “o maior fator que influencia a resistência de união é basicamente o teor de cimento; em geral, quanto maior o teor de cimento, maior a resistência de aderência” (MPA, 2023a). O teor de ar também é um fator importante para que teores de ar excessivamente elevados reduzam a ligação na interface do tijolo. Além disso, o intervalo de tempo entre o espalhamento e a colocação da argamassa deve ser mínimo. Como consequência, as unidades de alvenaria, uma vez colocadas e alinhadas, não devem ser movimentadas (Revuelta, 2021).

2.4.6.3 Durabilidade

Diferentemente do concreto que pode ter sua durabilidade afetada por agentes agressivos externos relacionados a ação de cloreto, carbonatação e outros, de modo geral, a argamassa não tem problemas em sua durabilidade provocado por tais agentes agressivos, a não ser por ações relacionados à procedimentos técnicos inadequado realizados durante à mistura dos componentes, no transporte, no lançamento ao substrato ou na escolha da composição do aglomerante (tipos de cimento ou cal).

A NBR 15575-1, que trata dos desempenhos das edificações, define o termo “durabilidade” como sendo a “capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas no manual de uso, operação e manutenção”. O termo “durabilidade” é comumente utilizado como qualitativo para expressar a condição em que a edificação ou seus sistemas mantêm seu desempenho requerido durante a vida útil (ABNT, 2024).

Por sua vez, a “durabilidade da argamassa” é definida como a “sua capacidade de suportar condições agressivas durante a sua vida útil” ou, “A resistência de uma argamassa a condições químicas, mecânicas e climáticas adversas.” (MPA, 2023a). Ou ainda é a “capacidade da argamassa em resistir a condições agressivas durante a sua vida útil”. A durabilidade deve ser adequada às situações em que a argamassa é utilizada. Por exemplo, uma argamassa de menor durabilidade pode ser adequada para paredes internas (Revuelta, 2021).

As influências potencialmente destrutivas que podem interagir com a argamassa são numerosas: água, geada, sais solúveis, mudanças de temperaturas, entre outras. Em geral, à medida que o teor de cimento aumenta, também aumenta a durabilidade. Argamassas de alta resistência à compressão geralmente apresentam boa durabilidade ao congelamento e descongelamento. A como visto anteriormente, entrada de ar nas argamassas também melhora a resistência aos danos causados pelo congelamento e degelo (MPA, 2023a).

2.4.7 Tipos de argamassas

A quantidade de tipos de argamassas na indústria da construção civil brasileira é bastante impressionante, principalmente das chamadas argamassas especiais ou técnicas, que são confeccionadas e direcionadas para a realização de um serviço em específico. Esse tipo de argamassas incluem uma ampla variedade de produtos, tantos quantos sejam necessários: argamassas colantes (AC), para impermeabilizações, para reparação e proteção de concreto, argamassa de rejunte, para texturização e muitos outros. Em geral, as argamassas de alvenaria e de reboco são as argamassas mais comuns e economicamente importantes, e que serão o objeto dessa seção.

2.4.7.1 Argamassa para reboco.

A argamassa destinada ao reboco de um prédio é um compósito constituído basicamente por cimento e agregado fino, geralmente acompanhado de cal ou plastificante, aplicada sobre a superfície de uma parede, geralmente em duas ou mais demões. Quando combinado corretamente com o fundo, o reboco endurecido proporciona um acabamento durável e resistente às intempéries, melhorando a superfície de um edifício (MPA, 2023b).

Segundo Santos (2003, apud Siqueira *et al.*, 2021), as argamassas de revestimento, para serem consideradas como adequadas, devem possuir trabalhabilidade ao ponto de propiciar fluidez necessária, que permita a penetração da colher de pedreiro, mantendo-se coesa no transporte ao substrato e sem aderência à colher no momento do lançamento, permanecendo úmida o tempo necessário para ser espalhada, cortada (no sarrafamento) e para receber o acabamento final.

Para Revuelta (2021), os rebocos externos representam a pele dos edifícios com o objetivo de proteger e embelezar as suas paredes de suporte. Regra geral, as principais razões para a utilização de uma argamassa de reboco são as seguintes: (1) proporcionar uma barreira que impeça a penetração da água da chuva na alvenaria de fundo, (2) proteger o edifício de

tensões mecânicas externas, (3) melhorar a aparência estética de uma estrutura de alvenaria lisa e (4) gerar uma superfície lisa para um bom acabamento.

Ainda segundo esse autor, a resistência da argamassa de reboco nunca deve ser superior à resistência do substrato. A natureza do substrato e a sua localização deverão ser compatíveis com os componentes da argamassa para obtenção de um revestimento com qualidade e durabilidade. Geralmente, o princípio fundamental na seleção de uma argamassa de reboco é selecionar ligantes com menor teor de cimento. Quanto mais espesso for o reboco, mais rico em cal deverá ser o ligante. Em alguns casos, o reforço é necessário para prevenir ou reduzir fissuras (Revuelta, 2021).

2.4.7.2 Argamassa para assentamento de alvenaria.

A função original da argamassa para assentamento de unidades de alvenaria era, provavelmente, vedar paredes permeáveis e fornecer proteção contra raio solar, chuva e vento. Certamente as argamassas ainda são utilizadas para cumprir essa função nos dias de hoje, mas com o desenvolvimento de novos materiais, novos produtos e novas técnicas construtivas, houve um aumento significativo da demanda para o uso das argamassas em diversas funções. Este tipo de argamassa tem sido parte integrante dos sistemas de paredes de alvenaria há séculos. Para todos os efeitos, argamassa de alvenaria é o agente de ligação que interage e integra tijolos e/ou outras unidades de alvenaria (blocos ou pedras) (Figura 04-a, b) em uma montagem de alvenaria (Revuelta, 2021).

Na NBR 13281-2: que trata sobre argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria, e estabelece os requisitos, critérios e métodos de ensaios para as argamassas inorgânicas destinadas ao assentamento de unidades de alvenaria (blocos e tijolos) com e sem função estrutural (vedação) e para as argamassas destinadas à fixação horizontal (encunhamento) da alvenaria sem função estrutural, independentemente da sua forma de produção (produzidas em canteiro, industrializadas, estabilizadas, usinadas, prontas para uso ou outras) e de aplicação (manual ou mecanizada), define “argamassa inorgânica para assentamento de unidades de alvenaria” como sendo a “argamassa utilizada para a ligação de blocos ou tijolos na elevação da alvenaria” (ABNT, 2023).

Em Siqueira *et al.* (2021), os autores ao se referirem às características da argamassa de assentamento descrevem que elas devem apresentar viscosidade moderada, fato que facilitaria o assentamento das unidades de alvenaria e, evitaria a perda de material além da segregação dos componentes que constituem a argamassa. E complementam dizendo que, uma viscosidade

elevada dificultaria o espalhamento da argamassa e diminuiria a superfície de contato entre do conjunto argamassa/bloco.

As argamassas modernas são feitas com cimento Portland. Elas são uma combinação de cimento, cal, areia e água. Os aditivos plastificantes líquidos são utilizados como substitutos à cal, para melhorar a trabalhabilidade e proporcionar alguma resistência aos fatores climáticos. As principais propriedades das misturas de argamassas para alvenarias, já vistas acima, são: resistência adequada, trabalhabilidade, retenção de água durante a realização do assentamento das unidades de alvenaria, plasticidade durante a aplicação, boa aderência ou ligação, durabilidade e boa aparência (referente a sua textura e cor) (Chudley; Greeno; Kovac, 2020).

2.4.7.3 A argamassa para assentamento de alvenaria na norma brasileira.

As designações referentes às argamassas inorgânicas para assentamento e fixação de unidades de alvenaria, de acordo com a NBR 13281-2 são: a) argamassa inorgânica para assentamento de unidades de alvenaria sem função estrutural (vedação) – AAV; b) argamassa inorgânica para assentamento de unidades de alvenaria estrutural – AAE; e c) argamassa inorgânica para a fixação horizontal de alvenaria (encunhamento) – AAF (ABNT, 2023).

Tabela 04 – Requisitos e respectivos critérios para argamassas inorgânicas para assentamento e fixação – Estado fresco.

Requisito	Unidade	Critérios por tipo de argamassa			
		AAV	AAE	AAF	Método de ensaio
Retenção de água (U) ^{a, b}	%	≥ 85	≥ 80	Informativo	ABNT NBR 13277
Teor de ar incorporado (A) ^{a, b}	%	≤ 22	≤ 18	Informativo	ABNT NBR 13278
Tempo de uso ^{c, d}	Min.	Informativo		-	
a. A retenção de água (U) e o teor de ar incorporado (A) das argamassas inorgânicas para assentamento (AAV e AAE) e para fixação horizontal (AAF) de unidades de alvenaria, independentemente da forma de produção, quer sejam produzidas em canteiro, industrializadas, estabilizadas, usinadas, prontas para uso ou outras, devem atender aos critérios estabelecidos nesta Tabela. b. A retenção de água (U) e o teor de ar incorporado (A) das argamassas inorgânicas para assentamento (AAV e AAE) e para fixação horizontal (AAF) de unidades de alvenaria devem ser informados pelo fabricante na embalagem e/ou na ficha técnica. No caso de argamassas inorgânicas produzidas em canteiro de obras para assentamento (AAV e AAE) e para fixação horizontal (AAF) de unidades de alvenaria, o responsável legal e/ou técnico pela obra deve realizar os ensaios e indicar a retenção de água (U) e o teor de ar incorporado (A) da argamassa, mantendo o seu registro nos controles da obra. c. O tempo de uso da argamassa inorgânica para assentamento (AAV e AAF) e para fixação horizontal (AAF) de unidades de alvenaria é definido como o intervalo de tempo máximo decorrido entre a mistura da argamassa e a sua aplicação, no qual a argamassa mantém inalteradas as suas propriedades no estado fresco, garantindo seu desempenho no estado endurecido, considerando os requisitos e critérios estabelecidos nesta Parte da ABNT NBR 13281. d. O tempo de uso da argamassa para assentamento (AAV e AAE) e para fixação horizontal (AAF) de unidades de alvenaria deve ser informado pelo fabricante na embalagem e/ou na ficha técnica. No caso de argamassas para assentamento (AAV e AAF) ou para fixação horizontal (AAF) de unidades de alvenaria produzidas em canteiro de obras, o responsável legal e/ou técnico pela obra deve determinar o tempo de uso da argamassa e manter o seu registro nos controles da obra.					

Fonte: Adaptado da NBR 13281-2 (ABNT, 2023).

Os requisitos e respectivos critérios para argamassas inorgânicas para assentamento (AAV e AAE) e para argamassa destinada a fixação de alvenaria (AAF), no estado fresco, estão estabelecidos nas tabelas 04 e 05:

A norma em questão faz ressalva de que a qualquer momento a trabalhabilidade poderá ser restabelecida pela remistura, sem acréscimo de água, dentro do tempo de uso estabelecido.

Tabela 05 – Valores limites para classificação da densidade de massa no estado fresco.

Classe	Densidade de massa no estado fresco (DF) kg/m ³	Método de ensaio
DF0	DF < 1.400	ABNT NBR 13278
DF1	1.400 ≤ DF < 1.600	
DF2	1.600 ≤ DF < 1.800	
DF3	1.800 ≤ DF < 2.000	
DF4	DF ≥ 2.000	

Fonte: Adaptado da NBR 13281-2 (ABNT, 2023).

A classe da densidade de massa no estado fresco (ver Tabela 05) da argamassa para assentamento (AAV e AAE) ou para fixação horizontal (AAF) de unidades de alvenaria deve ser informada pelo fabricante na embalagem e/ou na ficha técnica. No caso de argamassas produzidas em canteiro de obras para assentamento (AAV e AAE) ou para fixação horizontal (AAF) de unidades de alvenaria, a norma prescreve que o responsável legal e/ou técnico pela obra deve realizar o ensaio conforme a NBR 13278 e indicar a classe da densidade de massa no estado fresco (ver Tabela 2), mantendo o seu registro nos controles da obra.

Tabela 06 – Requisitos e respectivos critérios para argamassas inorgânicas para assentamento e fixação – Estado endurecido.

Requisito	Unidade	Critérios por tipo de argamassa			Métodos de ensaio
		AAV	AAE	AAF	
Resistência à compressão (f_a)	MPa	$2,0 \leq f_a < 5,0$	Tabela 07	$1,5 \leq f_a < 5,0$	ABNT NBR 13279
Variação dimensional (retração livre) (ϵ_i)	mm/m	$\epsilon_i \geq -0,80$ (retração menor ou igual a 0,80)			ABNT NBR 15261
Resistência potencial de aderência à tração ao substrato (R_i)	MPa	$\geq 0,20$			ABNT NBR 15258

Fonte: Adaptado da NBR 13281-2 (ABNT, 2023)

Já, referente ao estado endurecido, as argamassas inorgânicas para assentamento (AAV e AAE) e para fixação horizontal (AAF) de unidades de alvenaria, devem cumprir os requisitos e respectivos critérios estabelecidos na Tabela 06.

Os critérios de resistência à compressão estabelecidos para as argamassas inorgânicas para assentamento de unidades de alvenaria estrutural (AAE) devem atender os valores prescritos na Tabela 07.

Tabela 07 – Classes de uso e respectivos critérios de resistência à compressão da argamassa inorgânica AAE.

Classes de uso ^a	Classe de resistência à compressão da argamassa (fa) ^b MPa	Sugeridas para as seguintes faixas de uso em relação à resistência do bloco (fbk) MPa
AAE5	$5,0 \leq fa < 8,0$	$3 \leq fbk \leq 6$
AAE8	$8,0 \leq fa < 12,0$	$8 \leq fbk \leq 10$
AAE12	$12,0 \leq fa < 16,0$	$12 \leq fbk \leq 16$
AAE16	$16,0 \leq fa < 20,0$	$18 \leq fbk \leq 20$
AAE20	$20,0 \leq fa < 24,0$	$22 \leq fbk \leq 24$
AAEE (Especial)	$fa \geq 24,0$	^c

^a Valores de resistência estabelecidos considerando situações de uso em alvenaria estrutural de edifícios com paredes revestidas. Para outras situações de uso não consideradas nessas classes, por exemplo, alvenarias não revestidas, arrimos e reservatórios, recomenda-se utilizar argamassas inorgânicas com resistência à compressão superior ao considerado.
^b Resistência à compressão (fa) especificada pelo valor médio e coeficiente de variação inferior a 20 %.
^c Argamassas acima de 24 MPa são consideradas especiais, ficando sujeitas à especificação para cada obra por especialistas.

Fonte: Adaptado da NBR 13281-2 (ABNT, 2023b)

A classe de uso da resistência à compressão (ver Tabela 07) das argamassas inorgânicas para assentamento de unidades de alvenaria estrutural (AAE) deve ser informada pelo fabricante na embalagem e/ou na ficha técnica. No caso de argamassas produzidas em canteiro de obras para assentamento de unidades de alvenaria estrutural (AAE), o responsável legal e/ou técnico pela obra deve realizar o ensaio e indicar a classe de uso da resistência à compressão (ver Tabela 07) da argamassa, mantendo o seu registro nos controles da obra (ABNT, 2023).

A norma ainda traz algumas observações referentes à classificação e informação, conforme as que seguem: essa classificação é mesmo necessária?

1. Que as argamassas inorgânicas para assentamento (AAV e AAE) e as argamassas para fixação horizontal (AAF) de unidades de alvenaria devem atender integralmente a todos os requisitos classificatórios e informativos estabelecidos na NBR 13281-2, independentemente da forma de produção, quer sejam produzidas em canteiro de obras, industrializadas, estabilizadas, usinadas, prontas para uso ou outras, bem como da forma de aplicação (manual ou mecanizada) (ABNT, 2023).

2. As argamassas produzidas em canteiro de obras, industrializadas, estabilizadas, usinadas, prontas para uso ou outras que sejam indicadas para mais de uma destinação como revestimento, assentamento, fixação etc., devem atender cumulativamente a todos os requisitos

e critérios estabelecidos nas NBR 13281-1 e NBR 13281-2, em todas as suas aplicações (ABNT, 2023).

3. No caso de argamassas inorgânicas fornecidas e/ou adquiridas para a obra para assentamento (AAV e AAE) ou para fixação horizontal (AAF) de unidades de alvenaria, o fabricante da argamassa deve informar, de forma clara e bem visível, na embalagem e/ou na ficha técnica, as condições estabelecidas na Seção sobre “requisitos e critérios para argamassas inorgânicas para assentamento e para a fixação de alvenaria” (ABNT, 2023).

4. No caso de argamassas inorgânicas produzidas em canteiro de obras para assentamento (AAV e AAE) ou para fixação horizontal (AAF) de unidades de alvenaria, o responsável legal e/ou técnico pela obra deve realizar todos os ensaios estabelecidos na NBR 13281-2, e manter nos controles da obra o registro dos resultados de as condições estabelecidas na Seção sobre “requisitos e critérios para argamassas inorgânicas para assentamento e para a fixação de alvenaria” (ABNT, 2023).

2.5 ARGAMASSAS E REJEITO DE CAULIM

A utilização de resíduos industriais com comprovadas potencialidades para uso novos compósitos e reinserindo-o no ciclo econômico, é considerada hoje uma atividade que pode contribuir para a diversificação de produtos, diminuição de seus custos, além de fornecer “novas” matérias-primas a alguns sectores industriais. A reciclagem de resíduos industriais não é novidade e tem sido feita com sucesso em vários países. As razões que motivam essa tendência é o esgotamento de recursos naturais, a conservação de matérias-primas não renováveis, e a melhoria da saúde e segurança das pessoas, entre outras (Rodrigues Menezes *et al.*, 2002).

A utilização da argila calcinada, como material pozolânico na composição de argamassas e concretos vem recebendo considerável atenção nos últimos anos. Este interesse faz parte das iniciativas para minimizar o consumo de cimento Portland (CP), cuja produção de o principal componente (clinquer) tem uma pegada de carbono bastante acentuada sendo prejudicial ao meio ambiente. Outra razão é que a argamassa e o concreto, que contêm materiais pozolânicos, apresentam melhorias consideráveis nas propriedades de durabilidade (Sabir; Wild; Bai, 2001), (Courard *et al.*, 2003), (Khatib; Clay, 2004), (Siddique; Klaus, 2009).

Além do que diz a ABNT, trazemos a contribuição de outra literatura para enriquecer nosso estudo. Encontramos a definição de material pozolânico, que é definido como um material silicioso ou silicioso e aluminoso, sem valor cimentício direto, mas que, na presença

de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio (em temperaturas normais) para formar compostos possuindo propriedades cimentícias (Said-Mansour et al., 2011) tais como o silicato de cálcio hidratado e o aluminossilicato de cálcio hidratado (Courard *et al.*, 2003).

Diversos trabalhos sobre a utilização de rejeito de caulim, ou a própria argila caulinita, tem sido realizados nos últimos anos, mas pouquíssimos trabalhos a respeito do uso desse subproduto da indústria mineral, tem sido realizado sobre a argamassa.

2.5.1 O tratamento do rejeito de caulim

O uso de rejeito de caulim como materiais cimentícios suplementares (SCM - Supplementary cementing materials) é uma tendência que tem se intensificado e está em crescente expansão, pois esse subproduto da indústria mineral, ao receber tratamento térmico adequado, apresenta excelentes características técnicas, as quais tem sido demonstrada por inúmeras pesquisas, que comprovaram seu potencial de aplicação não só na área de construção, mas também nas indústrias de refratários e cerâmica avançada (Siddique; Klaus, 2009).

Nessa tendência, pesquisas têm sido desenvolvidas com objetivos de investigar as transformações térmicas de materiais a base de argila caulinita, onde essas passaram a demonstrar que os parâmetros de tratamento térmico como temperatura, taxa de aquecimento e tempo de exposição, assim como os parâmetros de resfriamento no final do ciclo de produção, influenciam significativamente no processo de desidroxilação. Normalmente, um dos métodos de produção de metacaulim (amorfo) é o tratamento térmico cuidadosamente controlado do caulim a temperatura de 700–800 °C (Shvarzman *et al.*, 2003), ou quando é processado a partir de argila de caulim de alta pureza por calcinação a temperaturas moderadas, para o autor entre 650 e 800 °C (Sabir; Wild; Bai, 2001).

Outros trabalhos demonstram ainda a viabilidade da utilização de derivados da argila caulinita. Nisso trazemos a informação compartilhado com Hela e Maršálová (2009) ao afirmarem que o aquecimento da argila com caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), como componente mineral básico, à temperatura que variam entre 500 °C e 600 °C, promove a retirada da água estrutural da substância, obtendo como resultado a deformação da estrutura cristalina da caulinita e efetivando a formação de uma forma reativa não hidratada - chamada metacaulinita (Hela; Maršálová, 2009).

Para Arruda Junior et al. (2022) o rejeito de caulim é constituído essencialmente por caulinita extremamente fina, apresenta excelente uniformidade e fácil manuseio. Para os autores, todos esses requisitos tornam-se de fundamentais importância para a produção de uma pozolana altamente reativa a partir de tratamento térmico (calcinação) e posterior moagem de

argilas de caulinita com características inerte, para outra substância reativa, denominada de metacaulinita (Arruda Junior *et al.*, 2022).

Em diversos autores, encontramos o intervalo de temperatura para a obtenção de material pozolânico a partir da desidroxilação da argila caulinítica. Para os autores esse procedimento leva à quebra da estrutura do caulim formando uma fase de transição com alta reatividade. Em Siddique e Klaus (2009), os intervalos de temperatura são entre 500 e 800 °C e entre 600 e 900 °C. Já para Neves e Melo Filho (2018) a faixa de temperatura varia entre 500 °C e 900°C. As propriedades pozolânicas do metacaulim produzido a partir de argilas caulinitas, aumentam com a taxa de desidroxilação e diminuem rapidamente após a ocorrência de recristalização observada para temperaturas acima de 900 °C, sendo essa a temperatura limite para a obtenção de um produto com reatividade pozolânica (Siddique; Klaus, 2009).

Corroborando com o pensamento acima, Said-Mansour *et al.* (2011), expressam que o metacaulim é uma forma em pó branco ultrafino de alumino-silicato, anidro, derivado da calcinação do caulim bruto. Quando se fala em calcinação, refere-se ao processo de queima controlada em uma faixa específica de temperatura, para obter um material quase amorfo. Nesse processo térmico, a primeira faixa de aquecimento, que vai até 100 °C ($T < 100^{\circ}\text{C}$), ocorre a remoção da água absorvida pela superfície da partícula de caulinita. Já para outras faixas de temperaturas mais elevadas, entre 400 °C e 650 °C, ocorre a desidroxilação da caulinita e, à medida que a temperatura aumenta ainda mais, atingindo a faixa entre 550 °C a 900 °C, o metacaulim se decompõe em óxido primário, e ao atingir temperaturas na faixa de 900 °C a 950 °C ocorre a formação de novo composto mineral, a mulita.

Este processo térmico de ativação ou desidroxilação, como já visto acima, leva à quebra ou quebra parcial da estrutura da rede cristalina presente no caulim, formando uma fase de transição altamente desordenada, amorfa e com pozolanicidade. E com relação à duração da exposição a temperaturas acima da temperatura que causa a desidroxilação, promove a recristalização para formar mulita e, portanto, perda de pozolanicidade (Said-Mansour *et al.*, 2011).

Em outros autores ainda encontramos as informações de suas experiências. A exemplo temos Alujas et al (2015), onde para os autores as argilas calcinadas a temperaturas de 600 °C demonstram alta superfície específica, desidroxilação praticamente completa da caulinita e decomposição incompleta dos argilominerais. A maior reatividade pozolânica é alcançada quando a argila é calcinada a 800 °C, sendo essa a temperatura que se obtém o melhor arranjo ou combinação entre a desordem estrutural da fração argila e sua superfície específica. Pois para os autores, o aumento da reatividade pozolânica com a elevação da temperatura de ativação

é limitado não apenas pela recristalização da estrutura do material em temperaturas acima de 900 °C, mas também pela diminuição da superfície específica que ocorre entre 800 e 900 °C (Alujas *et al.*, 2015).

Com relação ao processo de desidroxilação provocada pelo tratamento térmico aplicado sobre a argila caulinita ou seu derivado (rejeito), durante determinado período de tempo, a literatura apresenta duas formas diferentes de aplicação, sendo (i) “Processo instantâneo (*Flash process*)”, no qual, após a realização da moagem, as partículas de argila são imediatamente calcinadas ao passar pela chama do queimador; e (ii) “Processo de leito fluidizado (*Fluidized bed process*)”, no qual a argila bruta é calcinada em um forno durante várias horas antes da realização da moagem (Cassagnabère *et al.*, 2013).

Quando se faz referência em quais temperaturas trabalhadas para a obtenção do material pozolânico, Rodrigues *et al.* (2021) realizaram pesquisa para o desenvolvimento de novas composições de argamassas contendo resíduos de caulin (RC) natural e calcinado, onde avaliaram seu desempenho e comportamento de durabilidade. Em seu estudo, os autores utilizaram as temperaturas de calcinação de 600 °C, 650 °C, 700 °C, 750 °C e 800 °C. A adição de RCC nas composições de argamassa teve como efeito a diminuição da resistência mecânica à compressão; entretanto, as argamassas com substituição de 10% e 20% apresentaram valores de resistência dentro do limite mínimo de 2,4 MPa estabelecido em norma.

2.5.2 O efeito resíduo de caulin nas argamassas

Como vimos acima, a argila caulinita calcinada e seus derivados, como metacaulim possui propriedades pozolânicas. Esse fato acarreta efeitos positivos para as propriedades físicas de concretos e argamassas. As propriedades das substâncias pozolânicas promovem a reação química entre os seus componentes ativos com o hidróxido de cálcio (portlandita), que se forma como produto da hidratação do cimento (Hela; Maršálová, 2009).

Por sua vez, o hidróxido de cálcio, produzido pela hidratação do cimento, está associado a uma baixa durabilidade dos compósitos, e com essa reação química, tecnicamente ocorre a remoção do hidróxido de cálcio da argamassa e do concreto. Essa remoção de CH tem uma grande influência na resistência ao ataque de sulfato e na reação álcali-sílica (RAS), assim como fornece aumento da resistência e da durabilidade, que é derivada das fases cimentícias adicionais geradas pela reação de CH com MK. (Sabir; Wild; Bai, 2001).

Por outro lado, a temática sobre o uso de metacaulim e seus efeitos em argamassa não é nova. A literatura apresenta vários trabalhos que abordam esse tema, tais como de Courard *et*

al. (2003) que realizou a comparação da durabilidade das argamassas, no que diz respeito ao ataque de sulfatos e à difusão de cloretos, em argamassas com diversas taxas de substituição do cimento Portland comum por metacaulim. No trabalho o cimento é substituído em massa de 5 a 20% por metacaulim. Na pesquisa, a mistura com caulim natural também é estudada. Como resultado, os autores obtiveram que a substituição ótima do cimento por metacaulim, parece se encontrar entre 10% e 15% no que diz respeito ao efeito de inibição na difusão do cloreto e no ataque do sulfato.

Em Hela e Maršálová (2009), com sua pesquisa estudam a Influência do metacaulim nas propriedades reológicas de argamassas de cimento, os autores descrevem na pesquisa o uso de diferentes dosagens de metacaulim, como adição ativa e sua influência nas propriedades reológicas finais do compósito de cimento no estado fresco e nas propriedades físico-mecânicas resultantes no estado endurecido. Como parte dos resultados temos que a dosagem de 15% de metacaulim causa diminuição da trabalhabilidade da suspensão com o tempo, e que essa mesma quantidade resulta em perda de viscosidade com o tempo.

Segue ainda o estudo de Said-Mansour *et al.* (2011) que pesquisou a Influência do caulim calcinado nas propriedades da argamassa, onde os autores descrevem resultados de um projeto de pesquisa iniciado para estudar a calcinação do caulim local em diversas temperaturas (650–950 C) e durações (2, 3 e 4 h) para produzir metacaulim com alta atividade pozolânica. A atividade pozolânica foi avaliada pelos métodos de resistência à compressão aos 28 dias e pelo calor de hidratação. Os autores constaram os efeitos positivos do metacaulim, que julgaram ser atribuído à formação de aluminato de cálcio hidratados na argamassa modificada que se acredita serem mais quimicamente estáveis em ambientes altamente ácidos do que os de silicato de cálcio hidratados.

Outra pesquisa sobre o uso de metacaulim na argamassa é a de Cassagnabère *et al.* (2013), que investiga os impactos das características do metacaulim nas propriedades reológicas de argamassas no estado fresco. Foram empregadas quatro composições de metacaulins, oriundas de duas áreas e com dois processos de calcinação (leito fluidizado e calcinação flash), onde as taxas de substituição do cimento por metacaulim consistiu em de 12,5% e 25% em massa. Foram estudados ainda as relações entre várias propriedades do metacaulim e as propriedades de fluxo de argamassas. Os resultados mostraram que os metacaulins podem produzir diferenças significativas no escoamento das argamassas, como uma maior necessidade de água, dependendo de suas propriedades físicas e químicas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os tratamentos, as características, peculiaridades e particularidades dos materiais que faram ensaiados, analisados e utilizados em nossa pesquisa que resultou na confecção deste trabalho acadêmico.

3.1 Cimento Portland

Para esse trabalho, foi feito uso do cimento Portland em duas etapas. Primeiro, para a realização do ensaio do Índice de Atividade pozolânica (IAP) com cimento e, posteriormente, para a elaboração das diversas composições de argamassas que foi o foco da investigação e análise dessa pesquisa. Em ambos os casos foi utilizado o cimento Portland composto com Filler CP II-F-32.

Com relação à preparação das composições das argamassas, tínhamos a ideia de que, a priori, qualquer tipo de cimento Portland poderia ser empregado na elaboração das argamassas objeto desse trabalho. Porém, após análise e orientações, ficou decidido que o cimento a ser utilizado na pesquisa seria o Cimento Portland composto com Filler CP II-F-32, por não possuir adição de pozolana em sua composição e ser um dos mais disponível comercialmente na região metropolitana de Belém/PA.

Tabela 08 - Características físicas e mecânicas do cimento CP II-F-32.

Característica avaliada	Resultado	Normas
Massa Específica medida em laboratório (g/cm ³)	2,95	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Massa Específica / fabricante (g/cm ³)	2,80 ≤ γ ≤ 3,20	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Tempo de início de pega (h)	> 1	NBR 16607 (ABNT, 2018)
Superfície específica (cm ² /g)	3770	NBR 16372 (ABNT, 2015)
Tempo de fim de pega (h)	< 10	NBR 16607 (ABNT, 2018)
Finura na peneira # 200 (%)	< 12,0	NBR 11579 (ABNT, 2012)
Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	-
	3 dias	≥ 10,0
	7 dias	≥ 20,0
	28 dias	≥ 32,0

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante e ensaio realizado pelo autor.

Esse tipo de cimento é composto por 75 a 89 % de clinquer+Sulfato de cálcio (gesso), com adição de material carbonático (*filler calcário*) em teor entre 6 e 10%, que não é o mais indicado para aplicação em meios muito agressivos. Sua caracterização foi realizada no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFPA, onde a determinação da massa específica foi

realizada seguindo as recomendações da NBR 16605 (ABNT, 2017) e seu valor obtido foi de 2,95 g/cm³.

Na Tabela 08, estão representados os resultados referentes às características físicas e mecânicas do cimento CP II-F-32 em ensaio realizado no LEC da UFPA, assim como informações fornecidas pelo fabricante. A Figura 09 apresenta o comportamento da análise de granulometria à laser da amostra de cimento CP II-F-32, juntamente com o resíduo calcinado de caulim à 600 °C (RCC) realizada no Laboratório de Tecnologia de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da UFCG.

3.2 Rejeito do beneficiamento de Caulim

O rejeito do beneficiamento de caulim utilizado é oriundo da mina de exploração localizada na região do rio Capim, município de Ipixuna do Pará, estado do Pará, que é explorada pela empresa Imerys Rio Capim Caulim S/A (IRCC), que produz caulim de qualidade para a indústria de papel. No local o material passa primeiramente pelo pré-beneficiamento que inclui os processos de dispersão, desareiamento, centrifugação e empolpamento.

Figura 07 – Mina de exploração localizada na região do rio Capim



Fonte: <https://brasilminingsite.com.br/imerys-lanca-relatorio-de-responsabilidade-social/>

Em seguida, é bombeado a uma vazão entre 260 e 350m³/hora através do mineroduto de Ø 12 polegadas de diâmetro e de 158 km comprimento para a planta de beneficiamento da empresa no município de Barcarena/PA, onde é submetido a diversos processos industriais, gerando produtos e rejeitos, de onde o resíduo foi coletado. O rejeito analisado foi doado pela empresa Imerys.

Figura 08 - Planta Industrial da Imerys em Barcarena.



Fonte: <https://amazoniareal.com.br/incendio-em-barcarena/>

A escolha pela temperatura de 600°C para calcinação do rejeito de caulim tem sua origem na pesquisa desenvolvida por Silva (2024) com o título “Estudo de viabilidade técnica de utilização de um cimento composto por adições de resíduo de caulim da Amazônia para a produção de argamassa e concreto” onde a autora realizou o tratamento térmico do rejeito em diferentes temperaturas, das quais foi escolhida a de 600°C, sendo essa a menor temperatura em que a reação pozolânica se desenvolveu satisfatoriamente.

Outro fato, é que a temperatura de 600°C, por uma das temperaturas mais baixa utilizada na pesquisa, onde possivelmente, seja emitida para a atmosfera uma quantidade menor de CO₂, principalmente quando comparado ao consumo de energia térmica/elétrica utilizada para a produção do clinquer que é o principal componente do cimento Portland. Todo o processo de beneficiamento do rejeito de caulim pode ser conferido em Silva (2024).

O beneficiamento do rejeito de caulim iniciou-se com o processo de secagem em que o rejeito foi levado para a estufa, a uma temperatura constante de (110 ± 5) °C por 24 horas, para a obtenção de constância da massa. Em seguida, foi retirado da estufa e deixado resfriar até que atingisse a temperatura ambiente. Segundo esse procedimento, o rejeito foi separado para receber o tratamento térmico (calcinação) a uma temperatura de 600 °C por um período de 3 horas a partir do instante em que o forno (mufla) atinge a temperatura determinada. Após atingir as 3h de calcinação, o forno foi desligado e deixado resfriar naturalmente até retornar à temperatura ambiente (Silva, 2024).

Após esse procedimento de calcinação, a amostra de rejeito calcinada foi destorroada e levada para a moagem. O processo de moagem a seco feito no moinho de bolas da marca SERVITECH foi realizado a uma velocidade de, aproximadamente, 47 RPM. A carga moedora foi composta por 5 kg de esferas para cada 1kg de resíduo calcinado, sendo 2/3 de esferas

maiores, com diâmetro de 32mm e 1/3 de esferas menores, com diâmetro de 12mm. A moagem foi feita em circuito aberto, a seco, com tempo de 60 minutos. Esse tipo de moagem é largamente utilizado para a redução do tamanho das partículas de um material, pois a granulometria é um fator importante na reatividade da pozolana e no efeito *filler* quando adicionada ao cimento, argamassas e concretos (Pinheiro, 2016).

Essa etapa foi finalizada com o peneiramento do material, com o auxílio de um pincel, até passar em quase sua totalidade pela peneira de abertura 0,075 mm (#200) sendo descartado o material retido. O material peneirado foi identificado e guardado em potes lacrados com filmes de PVC para evitar umidades.

Após o processo de beneficiamento, a amostra do resíduo de caulim beneficiada foi submetida aos ensaios de caracterização conforme relação presente na Tabela 09. A partir deste ponto qualquer citação sobre o resíduo refere-se ao resíduo de caulim calcinado (RCC) aos 600°C.

Tabela 09 – Relação de ensaios realizados na caracterização do RCC.

Ensaio	Normatização
Massa específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Superfície específica	NBR 16372 (ABNT, 2015)
Composição granulométrica à laser	-
Difração de raio-X	-
Fluorescência de raio-X	-
Índice de atividade pozolânica com cal	NBR 5751 (ABNT, 2015)
Índice de atividade pozolânica com cimento	NBR 5752 (ABNT, 2014)
Análise termogravimétrica	-
Perda ao fogo	NBR NM 18 (ABNT, 2012)

Fonte: O autor.

O primeiro ensaio realizado na amostra de RCC foi o de *massa específica*, de acordo com o que está descrito na NBR 16605 (ABNT, 2017). Os ensaios foram realizados no laboratório de cimento (Cimento ELO) em Currais Novos – RN, no fim de abril/2022 e no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFPA.

Para a amostra do RCC tratado nessa pesquisa, o valor da massa específica foi estabelecido em 2,626 g/cm³, conforme mostra a Tabela 12.

Com relação à área ou superfície específica, o ensaio foi realizado no laboratório de cimento (Cimento ELO) em Currais Novos – RN, no fim de abril/2022. Para a execução desse ensaio foi utilizada a metodologia de permeabilidade ao ar (método Blaine), cujo procedimento encontra-se descrito na norma NBR 16372 (ABNT, 2015). Primeiramente, foi calculada a

massa específica do RCC utilizado no ensaio. Em seguida, foi aferida a finura do material por meio do equipamento de Blaine.

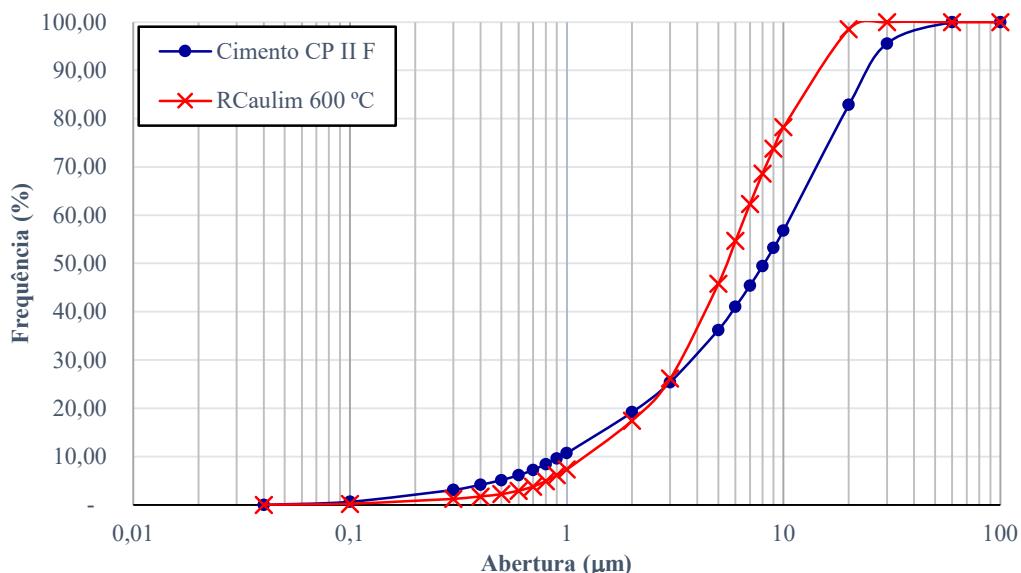
O limite normativo para este ensaio estabelece que a amostra deve apresentar um resultado $\geq 2600 \text{ cm}^2/\text{g}$. Para a amostra do RCC, o resultado do ensaio da área de superfície específica obtida pelo método de Blaine foi estabelecido em $4090 \text{ cm}^2/\text{g}$, conforme Tabela 12.

O ensaio de granulometria a *laser*¹³ consiste em um procedimento de alto padrão tecnológico utilizado por laboratórios especializados em análise granulométrica para determinar os tamanhos de partículas de materiais a granel de diversos tamanhos, pode medir centenas de nanômetros a milímetros.¹⁴

O ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Figura 09 - Análise de granulometria à laser das amostras de cimento

Portland composto (CP II-F-32) e RCC.



Fonte: O autor, Laboratório de Tecnologia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Pelo resultado do ensaio exposto no gráfico, percebe-se que em geral, as partículas do RCC são em sua maioria, menores que as partículas do cimento CP II F-32. E em relação ao volume de partículas, a amostra de RCC obteve maior volume para os grãos com diâmetro de aproximadamente $9 \mu\text{m}$ (ver apêndice). E de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), para ser considerado

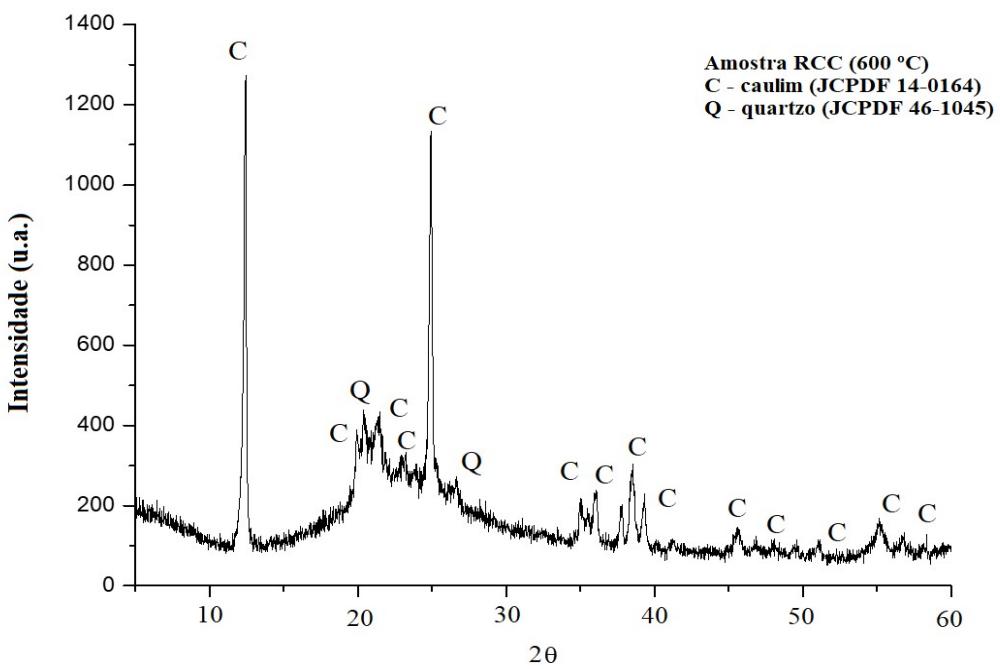
¹³ Definição coletada no site do Micro Services. Disponível em: <<https://www.microservices.com.br/ensaio-granulometria-laser>>. Acesso em: 23 jan. 2023.

¹⁴ Para Magno et al. (2017), atualmente, um dos instrumentos mais utilizados para análise granulométrica de sedimentos é o Laser Granulômetro (LG), um instrumento que funciona utilizando-se de diferentes princípios físicos e medindo diferentes características físicas das partículas de sedimentos.

pozolânico, é necessário que o material apresente um máximo de 34% de partículas retidas na peneira de malha 45 µm no ensaio de granulometria. Silva e Picanço (2022) afirmam que abaixo da granulometria de 0,045mm encontra-se um alto teor de caulim. Pelos resultados auferidos nesta pesquisa, constata-se que todas as amostras de resíduos cumprem este requisito normativo (Silva, 2024).

O ensaio de difração de raios-X (DRX) foi realizado no LEC da Universidade Federal de Goiás – UFG por Silva *et al.* (2023). As medidas de difração de raios X (DRX) foram realizadas em um difratômetro *Bruker D8 Discover*, utilizando-se radiação monocromática de um tubo com anodo de cobre acoplado a um monocromador Johansson para K α 1 operando em 40kV e 40mA, configuração Bragg-Brentano θ -2 θ , detector unidimensional Lynxeye, intervalo de 2 θ de 3° a 100°, com passo de 0,01°. As amostras foram mantidas em rotação de 15 rpm durante a medida.

Figura 10 - Difratogramas de raios-X das amostras analisadas.



Fonte: Silva et al., 2023.

A Figura 10 representada acima está ilustrando os difratogramas de raios-X da amostra analisada. Os espectros indicam que o RCC é constituído essencialmente pelo mineral caulinita, além do mineral acessório quartzo, que está presente na amostra. A excelente qualidade deste material como matéria-prima para adições pozolânicas, fica demonstrada pelo fato de ser a amostra constituída majoritariamente por caulinitas, pois segundo Barata (2007), a fabricação deste tipo de adição somente é possível por meio da calcinação de argilas contendo teores mínimos de 90% de caulinita (Silva et al., 2023).

As medidas de fluorescência de raios X (FRX) foram realizadas em um espectrômetro Rigaku modelo ZSX Primus IV, equipado com tubo de Rh. Para análise dos elementos menores, os resultados foram obtidos por pacote de curvas de calibração GeoTrace 3º da Rigaku. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de engenharia civil da UFG. Utilizou-se pastilhas prensadas, que foram confeccionadas pela mistura e homogeneização na proporção de 3g do aglutinante para 9g de amostra previamente seca. Essas pastilhas foram prensadas com uma força de 15 toneladas (Silva, 2024).

A partir da leitura dos resultados constantes na Tabela 10 podemos observar que a amostra apresenta concentração de SiO₂ de 51,49%.¹⁵ Na mesma tabela é possível verificar que na amostra analisada, o valor do somatório dos teores de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ é maior que 70% (99,50%), atendendo as especificações para que um material seja classificado como adição pozolânica da classe N, conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014).

Tabela 10 – Resultados obtidos no ensaio de Fluorescência de raios-X na amostra de RCC.

Elemento	Composição da amostra (%) RCC
SiO ₂	51,493
Al ₂ O ₃	47,392
Fe ₂ O ₃	0,620
TiO ₂	0,399
ZrO ₂	0,025
SrO	0,004
SO ₃	0,048
ZnO	0,009
CuO	0,007
Ga ₂ O ₃	0,005

Fonte: Adaptado de Silva (2024).

Conforme explica Silva (2024), as adições com maiores teores de Al₂O₃ possuem maior reatividade pozolânica, já que esta propriedade está diretamente ao maior teor de caulinita, que é o argilomineral potencialmente ativado pelo tratamento térmico. Por outro lado, segundo Christ, Tutikian e Helene (2022), pozolanas que possuem elevado teor de dióxido de silício SiO₂ reagem com Ca(OH)₂, formando produtos hidratados que melhoram o desempenho mecânico e a durabilidade do material, mas, um elevado teor deste componente pode vir a prejudicar a reatividade da pozolana produzida.

¹⁵ Segundo Christ, Tutikian e Helene (2022), pozolanas que possuem elevado teor de dióxido de silício SiO₂ reagem com Ca(OH)₂, formando produtos hidratados que melhoram o desempenho mecânico e a durabilidade do material. Todavia, um elevado teor deste componente pode prejudicar a reatividade da pozolana produzida.

Por esta análise, pode-se inferir que a amostra RCC usado nessa pesquisa, possui grande potencial para ser utilizado como adições pozolânica, mas merece atenção no uso.

O índice de atividade pozolânica (IAP) com cal do RCC foi medida por meio do ensaio com cal hidratada, cujo procedimento é descrito na NBR 5751 (ABNT, 2015). Dessa forma, foi dosada uma argamassa constituída por hidróxido de cálcio P.A., RCC, areia normal e água, nas proporções descritas pela referida norma. O resultado desse ensaio pode ser verificado na Tabela 12, que apresenta a média dos valores obtidos do índice de atividade pozolânica com cal para a amostra de RCC aqui estudada. A amostra de RCC analisada atingiu 6,06 MPa de resistência média, valor acima do parâmetro mínimo estipulado pela NBR 12653 (ANBT, 2014), que é de 6 MPa, aos sete dias de cura.

O ensaio de índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento foi realizado seguindo as orientações da NBR 5752 (ABNT, 2014) que especifica o método para determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias, na qual a determinação da atividade pozolânica de um material é medido em função do comportamento mecânico de duas argamassas, preparadas com traço em massa de 1:3 e consistência padronizada de 165 ± 5 mm. A primeira (A), de referência, é composta apenas de cimento, areia normal e água. A segunda (B), possui substituição de 25% do valor de sua massa pela substância pozolânica, a fração de RCC, já descrita nesse estudo e que se pretende analisar. O IAP com cimento Portland é definido como a relação entre as resistências à compressão da argamassa de referência e a argamassa com pozolana e cimento Portland, aos 28 dias. Para que um material seja considerado pozolânico, este índice, normalmente expresso em porcentagem, deve ser superior a 90%.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de IAP com cimento Portland

Amostra com temperatura de calcinação	Resultado médio da resistência à compressão aos 28 dias	Resultado atingido / requerido (%)
RCC	23,04	96,77
Argamassa de referência	23,81	100
Resistência requerida (conforme NBR 12653)	$\geq 21,43$	≥ 90

Fonte: Silva, 2024.

A Tabela 11 demonstra os resultados obtidos no ensaio de IAP com cimento para a amostra de RCC. Constatou-se que a amostra atendeu aos requisitos definidos pela NBR 12653 (ANBT, 2014), visto que alcançou mais de 90% (96,77%) da resistência mecânica quando comparadas com a argamassa de referência (Silva, 2024). Analisando em conjunto os ensaios

e os resultados do ensaio de IAP com cal e com cimento, constatou-se que a temperatura de 600°C foi suficiente para proporcionar ao RCC características adequadas para ser considerado como adição pozolânica, com o menor dispêndio de energia possível (Silva *et al.*, 2024).

Tabela 12 - Resultados dos demais ensaios de caracterização do RCC utilizado nas composições de argamassas da pesquisa em questão.

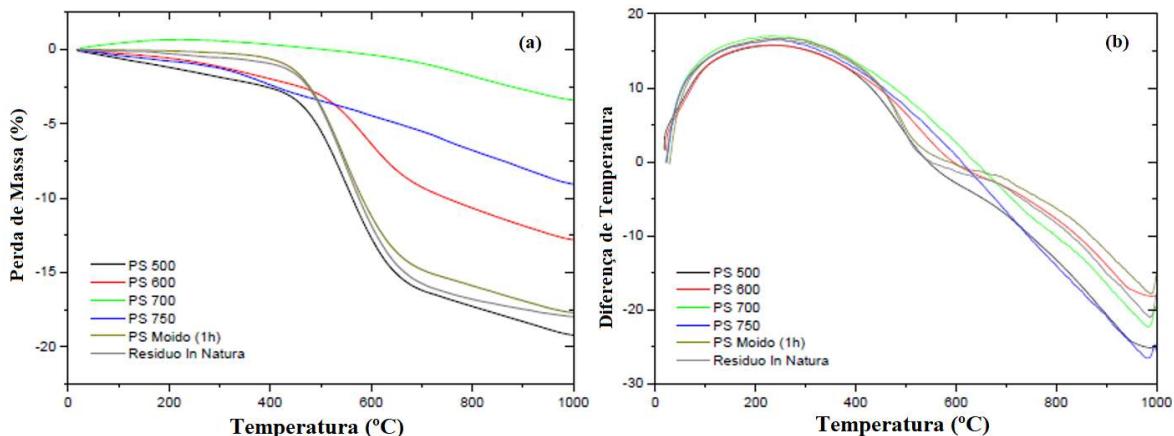
Ensaio	Referência	RCC à 600 °C
Massa específica	Valor (g/cm ³)	2,626
Percentual de perda ao fogo	Límite Normativo ≤ 10 (%)	6,30
Superfície específica	Valor (cm ² /g)	4090
Índice de atividade pozolânica com cal	≥ 6,00 MPa	6,06
Índice de atividade pozolânica com cimento	≥ 90% da argamassa ref.	96,77

Fonte: Adaptado de Silva (2024).

A análise termogravimétrica da amostra de RCC, foi realizada no laboratório de materiais da UFCG, utilizando um equipamento modelo RB 3020BP.

O resultado da análise termogravimétrica da amostra de RCC (juntamente com outras amostras *in natura* e calcinadas em outras temperaturas), encontra-se representados pelos gráficos das Figuras 11-a e 11-b (linha vermelha). A área de cada pico das curvas DTG representa as perdas de massa associadas ao processo de desidroxilação das caulinitas, calculadas para os intervalos de temperaturas apresentados.

Figura 11 - Variação do percentual de perda de massa (a); e variação térmica pela diferença de temperatura (b).



Fonte: Silva 2024.

Os resultados de TG/DTG e ATD mostram que o processo de conversão da caulinita em metacaulinita começa a ocorrer em 450°C, finalizando em cerca de 600°C, indicando então que a calcinação a uma temperatura entre 600°C e 700°C está adequada para este tipo de material. Além disso, podem ser observados os fenômenos da desidratação da hidroxila (OH), ou seja, a perda constitucional de OH⁻, que acontece entre 600 °C e 800 °C, transformando a caulinita em

metacaulinita, e a recristalização da metacaulinita convertendo-se em mulita, para temperaturas superiores a 800°C (Silva, 2024).

O ensaio para a determinação do percentual de perda ao fogo (PF) do RCC foi realizado no laboratório de cimento (Cimento ELO) em Currais Novos – RN. O procedimento seguiu ainda, as recomendações da NBR NM 18¹⁶ (ABNT, 2012) que estava em vigor à época. Uma pequena amostra de resíduo (50g) foi inserida em um cadinho e aquecida em mufla a 950 °C, durante 15 minutos. Após a sinterização, a amostra foi seca em dessecador e, posteriormente, foi pesada até a obtenção de uma massa constante. Verificou-se a ocorrência de diminuição do valor da massa da amostra inicial, devido à evaporação do dióxido de carbono (CO₂), presente no calcário e da água contida no gesso.

O valor desse ensaio atingido pela amostra de RCC foi de 6,30%, (ver Tabela 12) dentro do limite normativo que determina que as mostras em teste devem atingir valores ≤ 10 % de perda de massa.

3.3 Agregado miúdo

O item 3.2 da NBR 7211 (ABNT 2022) define agregado miúdo como sendo o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm. Em toda a pesquisa, foi utilizado dois tipos de agregado miúdo: a areia normal, para a realização dos ensaios de IAP com cal e IAP com cimento e a areia comum ou areia quartzosa, que foi utilizada como agregado miúdo para as produções das composições de argamassas que serviram como objeto de estudo dessa pesquisa.

A NBR 7214 (ABNT, 2015), define a areia normal como um material natural, processado e padronizado. Ela é composta principalmente por grãos de quartzo que variam de arredondados a subarredondados. A areia normal, empregada em 4 (quatro) frações iguais em massa, nas composições das argamassas destinadas à realização dos ensaios de IAP com cal e com cimento, foi adquirida diretamente junto ao IPT visto que deve atender a critérios específicos em relação à sua granulometria, requisitos físicos e químicos, além de tolerâncias para as diferentes frações granulométricas.

Esses critérios são essenciais para garantir que a areia normal atenda aos padrões de qualidade e especificações necessários para seu uso em diferentes aplicações, como na

¹⁶ Essa Noma Técnica entrou em desuso em junho de 2023, sendo substituída pela NBR17086-6 - Cimento Portland — Análise química - Parte 6: Determinação da perda ao fogo.

construção civil, indústria, entre outros setores. A areia normal deve estar separada em frações granulométricas, de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13 – Denominação das frações granulométricas da areia normal.

Denominação da fração	Material retido entre as peneiras de abertura nominal
16	2,4 mm e 1,2 mm
30	1,2 mm e 0,6 mm
50	0,6 mm e 0,3 mm
100	0,3 mm e 0,15 mm

Fonte: Adaptado da NBR 7214 (ABNT: 2015)

Por sua vez, a areia comum, utilizada como agregado miúdo nas composições de argamassas, que serviram como argamassa de referência e as que receberam substituição de cimento entre 10% e 40%, é a areia quartzosa comercialmente disponível nas lojas de materiais de construção na região metropolitana de Belém/PA (RMB).

Antes de realizar a incorporação desse agregado na produção das argamassas, a areia foi levada à estufa para secagem, a uma temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ pelo período de 24 horas. Posteriormente a areia passou pelo processo de catação para tirar parte das impurezas orgânicas (raízes e partículas de madeira), seguindo para o processo de peneiramento na malha 4,8 mm, onde foi descartado o material retido. Após esse processo inicial, foi realizada a caracterização da areia (agregado miúdo natural) seguindo o que prescreve as principais normas regulamentadoras com o auxílio de ensaios recomendados na literatura.

Tabela 14 - Caracterização física dos materiais anidros utilizados nas composições de argamassas.

Características	Cimento	RCC	Areia
Massa específica (kg/m^3) - NBR 16605 (ABNT:2017)	2955	2626	2604
Massa Unitária (kg/m^3) – NBR 16972 (ABNT:2021)	-	343	1570
Absorção 1 (%) – NBR 16916 (ABNT:2021)	-	-	1,01
Módulo de Finura – NBR 17054 (ABNT:2022)	-	-	1,73
Dimensão Máx. (mm) – NBR 17054 (ABNT:2022)	-	-	1,19
Coef. de Uniformidade – NBR 7181 (ABNT:2016)	-	-	2,75
Coef. de Curvatura – NBR 7181 (ABNT:2016)	-	-	0,91

Fonte: Pesquisa do Aluno.

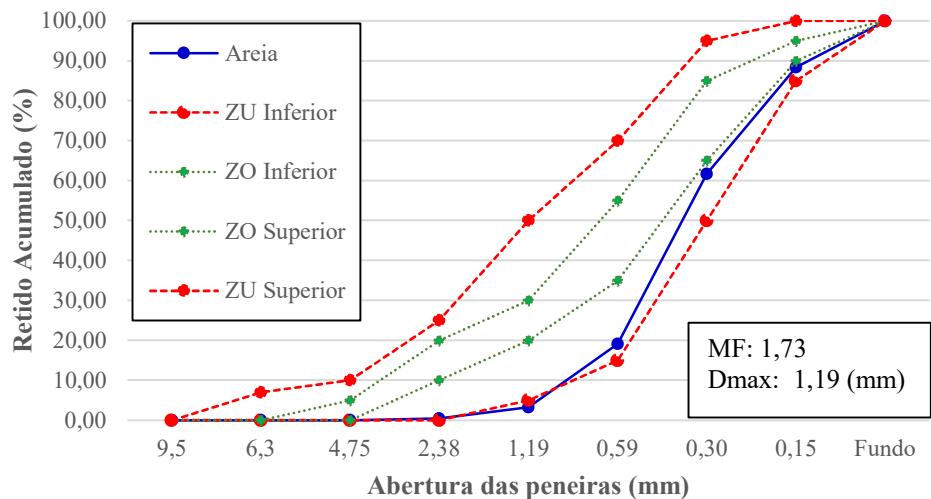
A determinação da composição granulométrica foi definida através da NBR 17054 (ABNT, 2022), massa específica, segundo os procedimentos descritos na NBR NM 52 (ABNT, 2009), massa unitária com base na NBR NM 45 (ABNT, 2006), inchamento, com base na NBR 6467 (ABNT, 2009) e, teor de umidade, conforme prescrito na NBR 9775 (ABNT, 2011).

A massa unitária foi estabelecida conforme o prescrito pelo Método C, definido na NBR 16972 (ABNT, 2021), que é empregado para determinar a massa unitária de material no estado solto.

Para a determinação da massa específica do agregado miúdo natural (areia), foi utilizada a NBR 16916 (ABNT, 2021). A massa específica do agregado na condição seca é o quociente entre a massa do agregado na condição seca e o volume de seus grãos, incluindo o volume dos poros permeáveis e impermeáveis e, excluindo os vazios entre os grãos (ver resultados na Tabela 14).

A Figura 12 apresenta a Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado nas composições de argamassas da pesquisa. Segundo a NBR 7211 (ABNT 2022), o módulo de finura de 1,73 (MF: 1,73) foi classificado como pertencente à zona utilizável inferior, cujos valores variam de 1,55 a 2,20. Pelo ensaio, o diâmetro máximo do agregado foi estabelecido como sendo 1,19 mm.

Figura 12 – Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado nas composições de argamassas desta pesquisa.



Fonte: Pesquisa do Aluno.

3.1.4 Água.

A água que foi utilizada em todas as etapas da pesquisa, foi água potável proveniente da rede pública de fornecimento local, que abastece o Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

3.1.5 Aditivo Plastificante.

O aditivo utilizado na produção das argamassas foi do tipo plastificante, tipo produto químico preparado, à base de resinas líquidas naturais modificadas, para a substituição da cal ou

do barro na produção de argamassas de assentamento e revestimento.¹⁷ As características são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Características técnicas do aditivo plastificante.

Características Técnicas do aditivo plastificante	
Aspecto físico:	Líquido
Cor:	Escuro
pH:	10,5
Densidade:	1,10 g/cm ³
Composição básica:	Resina natural de <i>pinus elliotti</i> e resina natural extraída da <i>araucária angustifólia</i> .
Sólidos:	5% em peso
Solubilidade:	Totalmente solúvel em água

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante.

A dosagem recomendada pelo fabricante é, para qualquer traço ou tipo de areia, usar 200 ml do aditivo por saco de cimento (50 quilos).

3.2 Dosagem e produção das argamassas

As dosagens para as composições de argamassas são realizadas de uma maneira mais empírica, de uma forma mais intuitiva, onde o pedreiro vai “medindo” a trabalhabilidade das argamassas pelo comportamento que essa vai demonstrando quando é manipulada pela colher, pela experiência do pedreiro, e até pelo ruído emitido pela betoneira, de acordo com a finalidade a que se destina (se a argamassa é para chapisco, assentamento, reboco etc.) a argamassa.

Fizemos a opção pela escolha da uma dosagem para a argamassa de assentamento com uma maior quantidade de cimento: 1:6 (uma parte de cimento para seis de areia). Essa escolha se justifica, em princípio, pela literatura chegamos aos traços para argamassas de assentamento com proporções em massa (cimento:areia) de 1:6, 1:7, 1:8 e 1:9. Entretanto, observamos nos dados constantes na tabela de controle (Tabela 16) e percebemos a diminuição de quantidade de cimento, juntamente com o aumento da relação água/cimento.

Somado a isso, consideramos as características da areia local utilizada na segunda etapa desse estudo, com sua distribuição granulométrica, o modulo de finura e a dimensão máxima característica (NBR 17054). Os dados acima, são indicativos que esses fatores, de forma individual ou em conjunto, poderiam deixar as composições de argamassas muito frágeis de modo a prejudicar a realização dos ensaios.

¹⁷ Ele apresenta propriedades tais como: um litro substitui aproximadamente 200 kg de cal ou de barro; elimina trincas, fissuras e/ou canais contínuos; aumenta o grau de impermeabilidade; dá ótima trabalhabilidade dispensando o uso de chapisco em paredes que ofereçam boas condições de aderência; a sua aplicação é muito mais leve e macia; a massa permanece homogênea por mais tempo na caixa; evita o surgimento de ondulações ou deformações no revestimento; não tóxico, não corrosivo, não inflamável e biodegradável.

Para a produção das argamassas foi necessário inicialmente além de definir a dosagem (1:6) para o cimento e areia, ficou definido a relação água cimento (a/c) em quantidade de água que proporcionasse uma consistência aproximada ao que prescreve a NBR 5751 (ABNT, 2015) sendo essa (225 ± 5) mm, obtido no ensaio de índice de consistência, conforme orienta a NBR 7215 (ABNT, 2019); e o tipo e dosagem do aditivo plastificante.

Tabela 16 – Quantidade de materiais e suas relações utilizados na produção de argamassas com 500g de aglomerante e 3000 g de areia em suas composições.

<i>Componente</i>	<i>Composições Argamassas</i>				
	<i>0%</i>	<i>10%</i>	<i>20%</i>	<i>30%</i>	<i>40%</i>
Cimento (g)	500	450	400	350	300
RCC (g)	0	50	100	150	200
Areia (g)	3000	3000	3000	3000	3000
Água (ml)	467	467	467	467	467
Aditivo (ml)	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2
Massa Seca (g)	3500	3500	3500	3500	3500
Relação aditivo cimento (adt/c) [%]	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Relação água massa seca (a/ms)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Relação água aglomerante (a/agl)	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
Relação água cimento (a/c)	0,93	1,04	1,17	1,33	1,56
Relação água argamassa fresca (a/argm F)	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

Fonte: Pesquisa do autor.

Nota: Como vista na tabela, as simbologias apresentadas representam: adt/c = Relação aditivo cimento; a/ms = Relação água massa seca; a/agl = Relação água aglomerante; a/c = Relação água cimento; a/argm F = Relação água argamassa fresca.

Na produção das argamassas, a relação água cimento (a/c) foi estabelecida como 0,93 para a argamassa de referência, cuja composição obteve boa consistência, trabalhabilidade e plasticidade. Nas demais composições a relação a/c aumentou em virtude da diminuição da quantidade de cimento que foi substituída por RCC. Para 10% de substituição a relação ficou em 1,04; para a substituição de 20%, ficou em 1,17; quando a substituição foi de 30%, a relação ficou em 1,33 e para 40% de substituição, ficou em 1,56 (ver Tabela 16).

Em relação ao aditivo plastificante, a primeira tentativa de produzir a argamassa, houve dificuldade de encontrar uma marca comercial que desempenhasse bem sua função proporcionando boas características à argamassa. O aditivo que melhor se adequou ao compósito foi um aditivo plastificante à base de resinas líquidas naturais modificadas, utilizando-se a dose máxima recomendada pelo fabricante (4 ml/kg de cimento), ficando essa relação (adt/c) fixada em 0,4% em função do cimento.

Na Tabela 16 acima, ainda podemos encontrar outras relações, as quais foram utilizadas nesse estudo a título de comparação entre as composições de argamassas, ou ainda como sendo parte de formulações utilizadas nos ensaios das propriedades das argamassas. Entre as relações

encontramos a relação água / massa seca (a/ms), ficando essa em 0,13; relação água aglomerante (a/agl) estabelecida em 0,93; e a relação água x argamassa fresca (a/argm F) fixada em 0,12.

A metodologia de preparo das argamassas seguiu as recomendações da NBR 16541 (ABNT, 2016). O preparo foi realizado com a utilização de um misturador de argamassa Stanley modelo SDR1400 (conforme dados fornecidos pelo fabricante) e de um recipiente (balde) plástico de dezoito litros. Dentro do recipiente era feita a pré-matura da areia e aproximadamente 1/3 da água, por 1,5 minutos. Em seguida, com a ajuda de uma colher de pedreiro era misturado o cimento com a areia úmida, com mais um minuto de mistura com o misturador Stanley.

Após essa etapa, era colocado parte da água restante na mistura e, com a ajuda do misturador, mexia-se mais 30 segundos. Finalmente, era colocado o aditivo plastificante, dissolvido em aproximadamente 50 ml de água. O misturador era ligado por mais 1,5 minutos, sendo considerada a composição de argamassa acabada e pronta para os ensaios.

Logo após ao término da produção das argamassas (em cada composição) foi realizado o “teste de bancada” que se trata de um procedimento simples de observação direta, onde analisa-se a aparência da argamassa, buscando observar sua trabalhabilidade e seu comportamento plástico como parâmetro reológico. Busca-se com isso observar: a consistência, se existe exsudação (perda e retenção de água), homogeneidade de mistura, empacotamento dos grãos do agregado, aspectos da forma após queda, aderência em ferramenta (colher) e trabalhabilidade.

Foram estudadas argamassas de assentamentos com traços definidos na proporção de 1:6, em massa, em razão de ser o traço mais comumente empregados nas obras da região e ser um dos que se encontram definido no caderno do SINAPI¹⁸.

Após a produção das argamassas realizou-se a moldagem das argamassas seguindo as recomendações da NBR 13281-2. Na tabela 17 são apresentados a relação dos ensaios realizados, com a norma de previsão e a norma do método de ensaio. Tais ensaios serviram para ajudar na caracterização da argamassa tanto em seu estado fresco quanto no endurecido, bom como para o estudo das características da trabalhabilidade, comportamento físico, e o

¹⁸ Sistema Nacional de Pesquisas de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), tem por objetivo a produção de séries mensais de custos e índices para o setor habitacional, e de séries mensais de salários medianos de mão de obra e preços medianos de materiais, máquinas e equipamentos e serviços da construção para os setores de saneamento básico, infraestrutura e habitação.

comportamento mecânico das composições de argamassas produzidas e que serviram como objeto de estudo dessa pesquisa.

Tabela 17 – Relação dos ensaios para a caracterização das argamassas inorgânicas para assentamento e para fixação de alvenaria.

	Ensaios	Relações de Ensaios	Método de ensaio
Estado fresco	Teste de bancada.	-	-
	Indice de consistência	ABNT NBR 13281-1	ABNT NBR 13276
	Densidade de massa no estado fresco (DF)	ABNT NBR 13281-1 e 2	ABNT NBR 13278
	Teor de ar incorporado	ABNT NBR 13281-1 e 2	ABNT NBR 13278
Estado endurecido	Retenção de água	ABNT NBR 13281-1 e 2	ABNT NBR 13277
	Resistência à compressão (fa)	ABNT NBR 13281-2	ABNT NBR 13279
	Variação dimensional (retração livre) (ϵ_i)	ABNT NBR 13281-1 e 2	ABNT NBR 15261
	Variação de massa (Δm_i)	-	ABNT NBR 15261
	Módulo de elasticidade dinâmico (Ed)	ABNT NBR 13281-1	ABNT NBR 15630
	Densidade de massa no estado endurecido (DE)	ABNT NBR 13281-1	ABNT NBR 13280
	Resistência à tração na flexão (Rf).	ABNT NBR 13281-1	ABNT NBR 13279
	Absorção de água por imersão (A).	-	ABNT NBR 9778
	Indice de vazios (Iv)	-	ABNT NBR 9778
	Massa específica (ρ)	-	ABNT NBR 9778

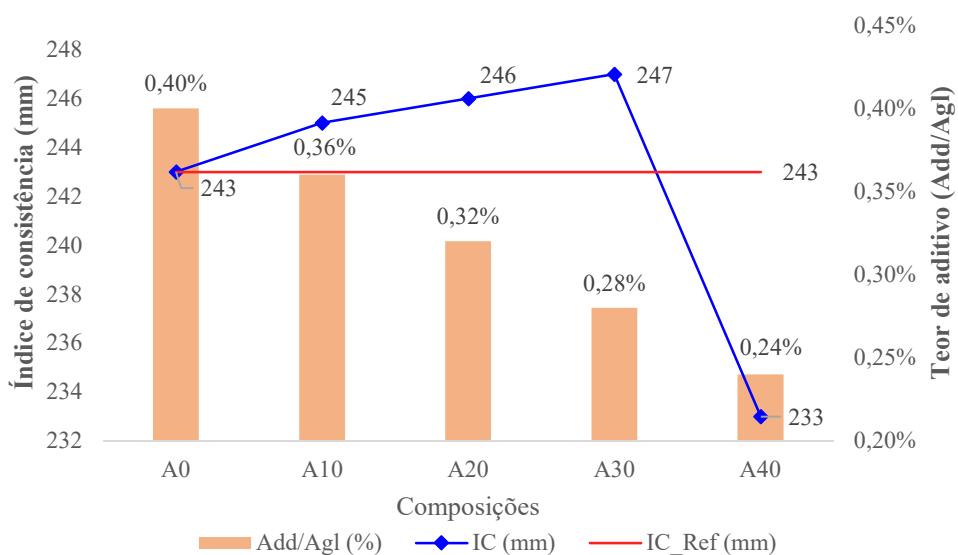
Fonte: Pesquisa do autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 O efeito do teor de rejeito de caulin na trabalhabilidade das argamassas de assentamento.

Com relação ao resultado da pesquisa onde buscamos identificar os efeitos causados pela substituição do cimento Portland por RCC na trabalhabilidade no estado fresco das argamassas de assentamento, algumas informações estão representadas na Figura 13. Nela estão representados, em colunas (laranja), os teores de aditivos plastificantes (em percentual) utilizados em cada composição de argamassa produzidas. Esses teores resumem a relação entre a quantidade de aditivo e a quantidade de aglomerante. Pela variação desses dados constatamos que à medida que aumenta o índice de substituição de cimento por RCC, o teor e a quantidade do aditivo plastificante vão diminuindo na mistura, em virtude da quantidade de aditivo ser fixada à quantidade de cimento presente na composição de argamassa.

Figura 13 – Comportamento do índice de consistência (ICs) e teor de aditivo plastificante nas composições de argamassas, comparado ao percentual de substituição do cimento Portland composto.



Fonte: Pesquisa do aluno.

A linha azul da Figura 13 representa os valores de índice de consistência em cada composição produzida, demonstrando de forma clara o comportamento dessa propriedade das argamassas, de acordo com o teor de substituição de cimento Portland pelo RCC. A linha vermelha, identificada pela simbologia IC_Ref, representa o índice de consistência da argamassa de referência, (sem substituição de cimento por RCC), servindo como parâmetro

para comparação e avaliação dessa característica, referentes às mudanças proporcionadas pelo processo de substituição do cimento pelo RCC.

Com essa ferramenta de análise (Figura 13), podemos fazer referência ao comportamento do conjunto de composições de argamassas estudadas, quanto ao comportamento do IC apresentado durante a realização do ensaio.

Os valores dos ICs foram medidos e analisados conforme determina a norma e os resultados aqui demonstrados indicam que, com o aumento do teor de substituição de cimento por RCC nas composições de A0 a A30, o IC também aumenta, indicando que, até o limite de 30% de substituição de cimento por RCC, a tendência é que as argamassas apresentem um maior espalhamento, ou seja, a argamassa ganha fluidez, o que propicia ICs para as composições A10, A20 e A30 maiores que IC da argamassa de referência.

Entretanto, quando o percentual de substituição ultrapassa 30%, chegando a 40% (entre as composições A30 e A40), ocorre um comportamento diferente do que vinha acontecendo. A composição de argamassa com teor de 40% de substituição, apresenta uma argamassa mais seca que as composições anteriores, refletindo isso pelo valor obtido no ensaio de índice de consistência que passou de 247 mm em A30 para 233 mm em A40, valor menor que todas as demais composições, inclusive da composição de referência A0 (ver linha vermelha da Figura 13). Nitidamente, entre as argamassas A30 e A40 há um ressecamento, uma perda de plasticidade por parte da argamassa A40, comprovada pela linha azul que representa os ICs de todas as composições de argamassas, cortando a linha vermelha (IC da argamassa de referência).

A quantidade de aditivo plastificante utilizado em cada composição também foi sendo reduzida ao longo do processo de substituição de cimento Portland por RCC. Em argamassas com teores cada vez maiores de substituição a quantidade de cimento diminuiu (A0, A10, A20, A30 e A40), ao mesmo tempo em que foram sendo incorporadas proporcionalmente quantidades cada vez menores de aditivos plastificantes (com 0,40%, 0,36%, 0,32%, 0,28% e 0,24% respectivamente), visto que a dosagem desse componente estava atrelada à quantidade de cimento Portland incorporado à mistura em cada composição.

Ressalte-se que, mesmo com a redução da proporção de aditivo incorporada na mistura entre as composições A0 e A30, houve um aumento do índice de consistência da argamassa que passou de 243 mm em A0 para 247 mm em A30. Essa alteração da consistência mostra que em quantidades específicas, o RCC possui a característica plastificante, quando adicionado à argamassa. Foi constatado que a proporção ótima ficou em torno de 30% de substituição de cimento Portland por RCC, para a dosagem utilizada nessa pesquisa. Nessa propriedade é

perceptível que há uma mudança de comportamento entre as composições de A30 e A40. Entre esses dois teores de substituição há claramente um ressecamento, uma perda de plasticidade por parte da composição da argamassa A40. Essa composição da argamassa se apresentou-se bem mais seca que todas as demais, conforme foi comprovado pelo IC abaixo, inclusive, do IC da argamassa A0.

Pelo que foi observado durante a inspeção visual, podemos afirmar que pelo processo de substituição do cimento Portland, a adição do RCC às misturas, em princípio, a cada adição sucessiva tornou as composições de argamassa (A10, A20 e A30) um pouco mais fluida que a argamassa anterior, comprovada em parte, pelo índice de consistência medido e pela manipulação do compósito com a espátula e colher de pedreiro. Mas, quando a substituição chega a 40% de RCC, a argamassa perde fluidez, tornando-se a mais seca de todas as composições estudadas, apresentando um aspecto argiloso, quando comparada com as demais composições.

Outro comportamento analisado está relacionado aos efeitos promovidos pelo uso de aditivo plastificante. Trata-se da característica de coesão de todo o conjunto de argamassas estudado.

Nessas, os critérios adotados para análise foi a presença ou ausência de exsudação e/ou segregação nas composições de argamassas. Foi observado, que todas as composições analisadas podem ser consideradas como “coesas”, apesar de que em algumas composições apresentarem certa liberação de água (exsudação), como percebido na argamassa de referência A0. E, apesar da redução da quantidade de aditivo plastificante, a água liberada foi diminuindo, mostrando que o RCC possui esse efeito positivo de retenção e incorporação da água nas argamassas (ver Quadro 04).

Com a argamassa de referência A0, foi observada a presença de pouca quantidade de água se acumulando na borda da argamassa, que é indicativo de perda de água (exsudação), mas o brilho se apresenta em toda a sua composição, demonstrando a presença de água em toda a mistura. Por sua vez, a argamassa A10, apresentou aspectos de coesão e consistência melhores, quando comparada à argamassa de referência, A0. Características como brilho, homogeneidade, envolvimento de agregado miúdo e empacotamento, apareceram muito mais nítidas com o uso dessa composição, demonstrando que no estado fresco a argamassa A10 possui uma melhor consistência, sem perda de água. Entretanto, cerca de 25 min após a realização do ensaio de índice de consistência, (onde apresentou uma excelente trabalhabilidade), na fase final da moldagem dos CPs prismáticos, visualmente a argamassa

A10 apresentou uma perda de fluidez, um ressecamento parcial. Ainda se observava a presença de água (característica expressa pelo brilho) porém, muito menos plástica.

Quadro 04 – Canvas referente aos aspectos visuais das composições de argamassas, conforme o teor de substituição, para análise de coesão, plasticidade.

% de resíduo	Aspecto em imagens		
<i>A0 (0%)</i>			
<i>A10 (10%)</i>			
<i>A20 (20%)</i>			
<i>A30 (30%)</i>			
<i>A40 (40%)</i>			

Fonte: Pesquisa do aluno.

A composição A20 apresentou coesão e consistência melhores, quando comparada às composições de argamassas A0 e A10. Aspectos como brilho, homogeneidade, envolvimento de agregado miúdo e empacotamento apareceram muito mais nítidos na composição A20, quando comparada com a argamassa A0. Essa composição se assemelha à argamassa produzida com a substituição de 10% da massa do cimento A10, demonstrando visualmente no estado fresco, apresentar uma melhor consistência, retendo e distribuindo melhor a água (ver Quadro 04). Inicialmente, a composição A20 apresentou uma excelente trabalhabilidade, porém, com o passar do tempo (aproximadamente 30 minutos), apresentou perda de trabalhabilidade, aparentando ressecamento parcial. Ainda, se observava a presença de água (característica expressa pelo brilho), mas muito menos plástica.

A composição de argamassa A30 apresentou coesão e consistência melhores, sem perda de água, quando comparadas às composições A0, A10 e A20. Características como brilho, homogeneidade, envolvimento de agregado miúdo, empacotamento e aderência inicial na

colher apareceram com uma nitidez muito melhor, quando comparadas às anteriores. Por outro lado, ocorreu o mesmo ressecamento observado na composição A20 e a mesma excelente trabalhabilidade inicialmente, mas com ressecamento em torno de 30 minutos depois. Mas ainda se observava a presença de água (característica expressa pelo brilho), só que menos plástica.

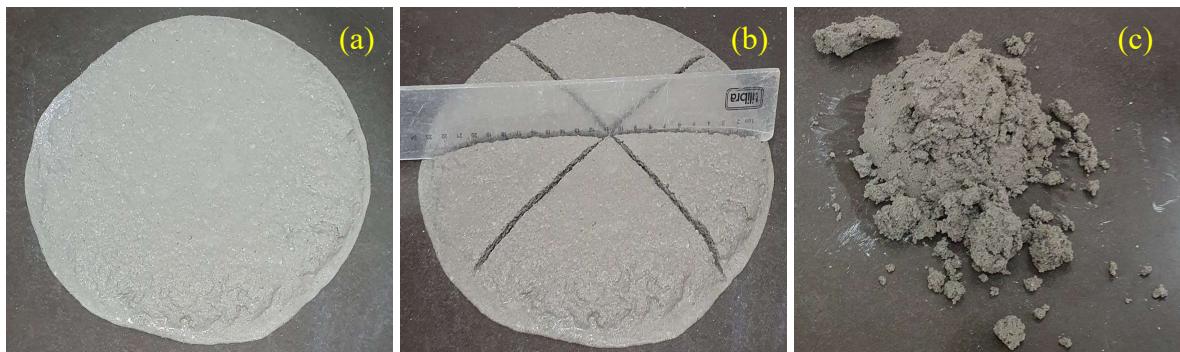
Figura 14 – Realização do ensaio de índice de consistência e teste de bancada na composição de argamassa.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Todas as observações realizadas na produção das argamassas A10, A20 e A30 se repetiram para a composição A40, onde a argamassa de assentamento produzida apresentou boa coesão e consistência, quando comparada às argamassas com 0 a 30% de substituição. Entretanto, essa coesão se apresentou como sendo uma argamassa mais pesada, de difícil trabalhabilidade, com aspecto argiloso (ver Figuras 14 e 15). Essa característica foi comprovada com a realização dos ensaios que se sucederam, a exemplo do índice de consistência, onde foi observado que o espalhamento foi menor quando comparado a todas as demais composições e sua densidade de massa no estado fresco é maior que todas as outras.

Figura 15 – Realização do ensaio de índice de consistência e teste de bancada em argamassas com 40% de substituição de cimento Portland por RCC.



Fonte: Pesquisa do autor.

Sobre esse ensaio e o teor de ar incorporado, houve dificuldade para suas efetivações, tanto na tentativa de colocação da argamassa dentro dos recipientes utilizados quanto nas moldagens dos CPs prismáticos.

Sobre essa perda de fluidez (ver aspecto na Figura 15-c), com o passar do tempo encontramos na literatura a pesquisa de Hela e Maršálová (2009) em que, ao utilizarem a dosagem de 15% de metacaulim em concreto, perceberam a diminuição da trabalhabilidade da suspensão com o tempo. Ao mesmo tempo, observaram que o aumento da proporção percentual de metacaulim na mistura de concreto pareceu exigir maior dosagem de superplastificante para garantir maior tempo de trabalhabilidade.

Em todos os casos, para essa pesquisa, as argamassas se apresentaram bem homogêneas, com uniformidade, não apresentando segregação entre a pasta, o agregado miúdo e a água de amassamento. Em alguns casos, como em A10, A20 e A30, a adição do RCC aumentou a homogeneidade e o brilho característico, indicando a presença e boa distribuição de água em toda a argamassa.

Todos os procedimentos foram fotografados para ajudar na análise visual, das aparências e para a obtenção de horário. Constam ainda os procedimentos de manipulação de argamassa, o teste de aderência inicial em colher ou espátula de pedreiro e a verificação visual da coesão e plasticidade de todas as composições. Todos esses itens verificados foram analisados, classificados de acordo com as normas (NBRs) e consideradas como tecnicamente viáveis, com características boas e satisfatórias para o emprego do RCC nas composições das argamassas elaboradas para o assentamento e fixação de alvenaria.

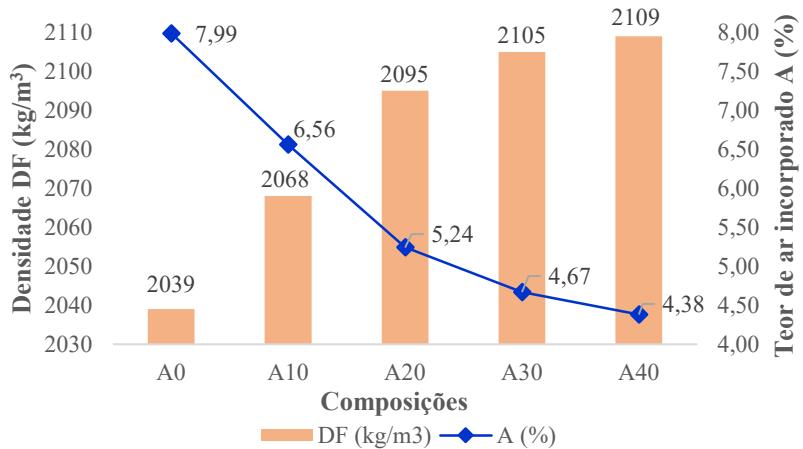
4.2 O efeito do teor de rejeito de caulim no comportamento físico das argamassas de assentamento.

Na Figura 16 tem-se os resultados de Df e A(%). Observou-se que à medida que se aumenta o teor de RCC na mistura cimentícia, a densidade de massa no estado fresco também aumenta. Com o processo de substituição do cimento por RCC, houve um aumento progressivo na densidade de massa das composições das argamassas no estado fresco. Iniciando com a densidade de 2039 kg/m³ para a argamassa de referência (A0), e chegando à densidade de 2109 kg/m³ para a composição com o teor de substituição de cimento de 40% (A40).

Desse modo, a cada variação positiva na substituição de cimento, a argamassa tende a ficar mais pesada, caracterizada pelo incremento nas densidades das composições de

argamassa, apresentando índices de 1,42% na argamassa A10, até atingir 3,43% para a argamassa A40, comparadas à argamassa de referência (A0).

Figura 16 – Comportamento dos valores dos ensaios de densidade de massa no estado fresco (Df) e do teor de ar incorporado (A).



Fonte: Pesquisa do aluno.

Apesar de haver variações nas densidades de cada composição, tais variações não apresentaram grandes diferenças, pois como visto acima, o incremento máximo (na densidade de massa no estado fresco) foi de 3,43% comparado ao valor da densidade de massa da argamassa de referência (de $2039 \text{ kg}/\text{m}^3$ para $2109 \text{ kg}/\text{m}^3$). Observa-se que pelo resultado apresentado pelo ensaio, as composições de argamassas produzidas pertencem à classe DF4, acima de $2000 \text{ kg}/\text{m}^3$ no estado fresco. Pelos limites definidos na NBR 13281-2, as composições estudadas nessa pesquisa entram na classe de argamassas com maior densidade, ou mais pesadas, conforme descrito acima e os resultados da experiência apresentada no trabalho de Harbi *et al.* (2017).

O ar incorporado na argamassa corresponde aos vazios formados pela quantidade de ar introduzida e incorporada por estas. Por sua vez, a substituição do cimento Portland composto pelo RCC, altera também, o teor de ar incorporado na argamassa. Ao realizar a experiência, observamos que inversamente aos resultados da “densidade de massa no estado fresco”, o “teor de ar incorporado” nas composições de argamassas possui a tendência de diminuição à medida que o teor de substituição do cimento Portland composto por RCC aumenta (ver Figura 16).

O maior teor de ar incorporado obtido, foi com a argamassa de referência A0, que apresentou um resultado de 8%. À medida que o cimento Portland composto começa a ser substituído por RCC, o teor de ar incorporado obtido é cada vez menor. Na argamassa A10, o teor foi de 7%. Por sua vez, nas argamassas A20 e A30, o teor foi de 5% e na argamassa A40, foi obtido, 4%, o menor teor de ar incorporado.

Conforme previsto pela NBR 13281-2, o teor de ar incorporado em argamassa para assentamento de unidades de alvenaria de vedação está limitado a 22%. Por sua vez, para a argamassa ser utilizada em assentamento de alvenaria estrutural, esse limite baixa para 18% e, para argamassa destinada ao encunhamento, esse o teor é apenas informativo. Todas as composições de argamassas elaboradas nessa pesquisa apresentaram valores bem abaixo dos limites estipulados em norma, podendo serem usadas, inclusive, para alvenaria estrutural.

Esses fenômenos físicos estão todos interrelacionados, sendo que argamassas que possuem maior densidade no estado fresco, possuem um menor teor de ar incorporado. Logo, podemos afirmar que quanto maior o teor de substituição de cimento Portland por RCC, mais densas se tornam as argamassas e com menor teor de ar incorporado.

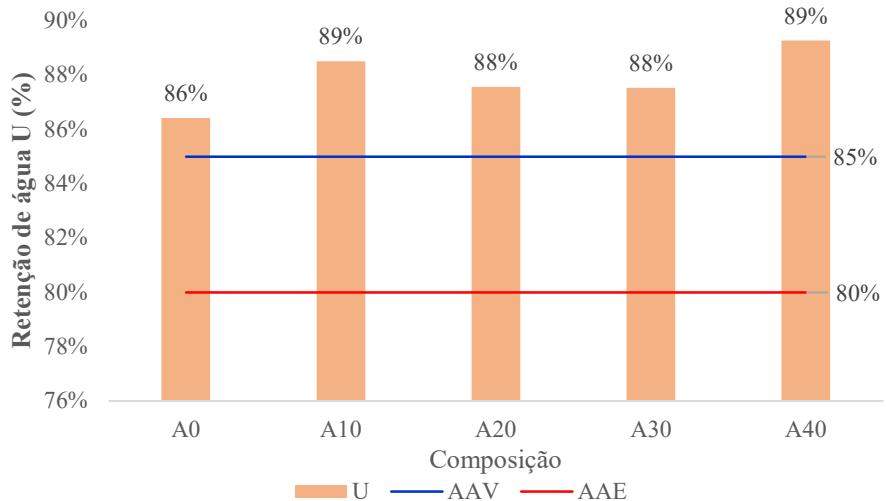
Outros fatos a serem observados nesse estudo são a diminuição de custos e a economia de materiais para a produção de um metro cúbico (m^3) de argamassa. Teoricamente, para a produção desse volume da argamassa de referência A0, seria necessário consumir 279 kg de cimento. Com a substituição de 10% do cimento Portland por RCC, haveria uma economia de cerca 28 kg de cimento por m^3 de argamassa produzida. Mas se considerarmos os valores empíricos obtidos pela realização dos ensaios nas argamassas, ponderando suas densidades de massa e teores de ar incorporado, essa economia ficaria ainda maior, onde só na argamassa de referência se economizaria cerca de 22,3 kg de cimento por m^3 .

Com a substituição do cimento Portland e o incremento do RCC em cada composição, considerando dessa vez os valores empíricos (2039, 2068, 2095, 2105, 2109 kg/ m^3), essa economia em relação à argamassa de referência A0, seria de 22,43 kg para A10; 45,80 kg para A20; 71,31 kg para A30 e; 97,54 kg para A40. Uma perspectiva de economia de quase dois sacos de cimento de 50 kg em cada m^3 de argamassa de A40 produzido, quando comparado à argamassa de referência A0.

Outra característica analisada, que reflete os efeitos do teor de rejeito de caulim calcinado no comportamento físico das argamassas de assentamento é o ensaio de retenção de água nas composições de argamassas.

Os resultados obtidos mediante a realização do ensaio de retenção de água, com a argamassa no estado fresco, estão ilustrados pelas colunas (laranja) na figura 17, onde podemos observar que há uma clara tendência de crescimento nessa propriedade (retenção de água - em percentual) quando comparada com o teor de substituição do cimento Portland pelo RCC. Com relação à composição A0, observa-se um aumento em A10. Em seguida, percebe-se uma queda em A20, com estabilização em A30 e novo crescimento em A40.

Figura 17 – Comportamento dos resultados do ensaio de retenção de água Ra/U (%) referente ao teor de substituição de resíduo (%) em cada composição de argamassa.



Fonte: Pesquisa do aluno.

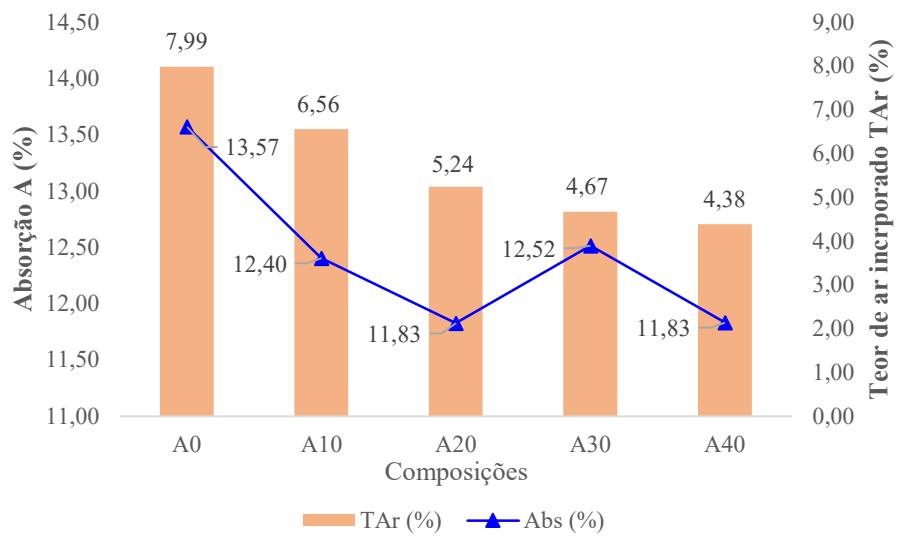
Na Figura 17, estão presentes duas linhas. A linha vermelha, com valor constante de 80%, representando o limite mínimo para esse ensaio em argamassa inorgânica destinada ao assentamento de unidades de alvenaria estrutural (AAE). E a linha azul, valor constante de 85%, representando o limite mínimo de retenção de água, para argamassa inorgânica de assentamento de unidades de alvenaria de vedação (AAV) sem função estrutural. Os resultados do ensaio nos mostram que todas as composições de argamassas apresentaram bons resultados para esse ensaio, com o valor da retenção de água (%) ficando acima do limite inferior estipulado em norma para ambas as finalidades de argamassa (estrutural e vedação). Com a adição do RCC houve ainda a tendência de subida do percentual de retenção de água nas argamassas. Para a argamassa inorgânica destinada ao encunhamento (AAF) os resultados de ensaios são apenas informativos.

Pode-se comparar ainda, dois ensaios realizados e considerados como características físicas da argamassa, sendo um no estado fresco e outro no estado endurecido. Essas características são apresentadas pelo teor de ar incorporado (A%) e pela absorção por imersão total (A%). Pela Figura 18, podemos verificar que com o aumento do teor de substituição de cimento por RCC, a tendência é que os valores obtidos pelos percentuais de absorção, a cada incremento de RCC, é diminuir, ou seja, aparentemente são formados menores quantidades de vazios no interior da argamassa.

Quando comparamos os resultados alcançados pelos dois ensaios (teor de ar incorporado e absorção por imersão total) entre si (Figura 18), fica evidente que a resposta de cada composição, em ambos os ensaios, apresenta tendência de diminuição quando o cimento

Portland é substituído pelo RCC. Para o ensaio de absorção de água por imersão total, a composição A30 apresenta um aumento nessa característica, quando comparado ao valor de A20. A absorção de água passa de 11,83% na composição A20 e aumenta para 12,52% na composição A30. O valor volta a cair novamente para a composição A40, atingindo o mesmo valor da composição A20.

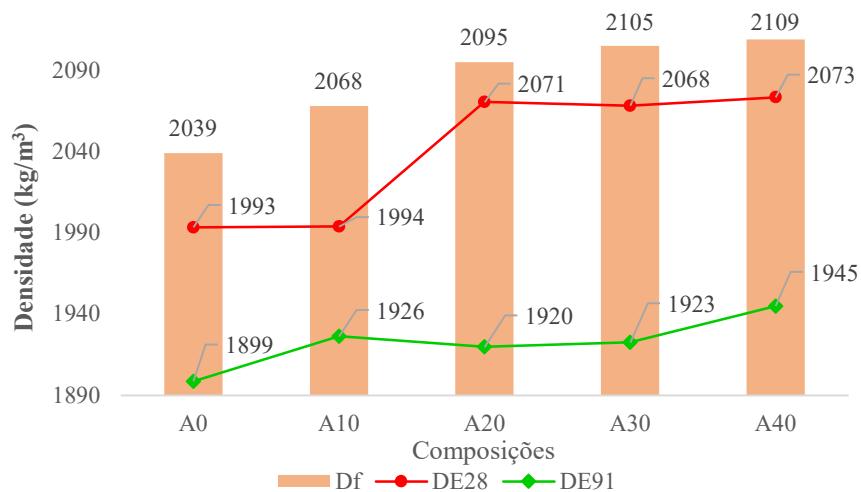
Figura 18 – Resultados do ensaio de Absorção por imersão total A (%) e do Teor de ar incorporado A (%) em cada composição de argamassa.



Fonte: Pesquisa do aluno.

Ao compararmos os três momentos de densidades de massa medidas (estado fresco e estado endurecido aos 28 dias, e estado endurecido aos 91 dias) na Figura 19, percebemos que, as três estão relacionadas entre si, apresentando o mesmo comportamento.

Figura 19 – Comportamento das densidades de massa no estado fresco (Df), no estado endurecido aos 28 dias (DE28) e no estado endurecido aos 91 dias (DE91) em cada composição de argamassa.



Fonte: Pesquisa do aluno.

A densidade de massa no estado fresco (Df) apresenta um comportamento de crescimento regular e constante, demonstrando que a cada aumento no teor de substituição de cimento Portland por RCC na mistura, ocorre um incremento na densidade de massa no estado fresco das composições de argamassa em estudo.

Por sua vez, a densidade de massa no estado endurecido na idade de 28 dias (DE28), apresenta um comportamento estável entre as composições A0 e A10, com crescimento acentuado entre as composições A10 e A20, seguido de outro trecho de estabilidade entre as densidades das composições A20 à A40.

Já, o comportamento da densidade de massa no estado endurecido na idade de 91 dias (DE91), apresenta um crescimento acentuado entre as composições A0 e A10, com estabilidade entre as composições A10 e A30, acentuando também entre as composições A30 e A40.

De modo geral, os comportamentos indicam que à medida que se adiciona resíduo calcinado, aumentando o teor de substituição do cimento por RCC, ocorre o aumento dos valores das três densidades medidas. Ou seja, o incremento de RCC na mistura das composições de argamassas exerce influência no aumento das densidades no estado fresco, e nos estados endurecidos das referidas argamassas.

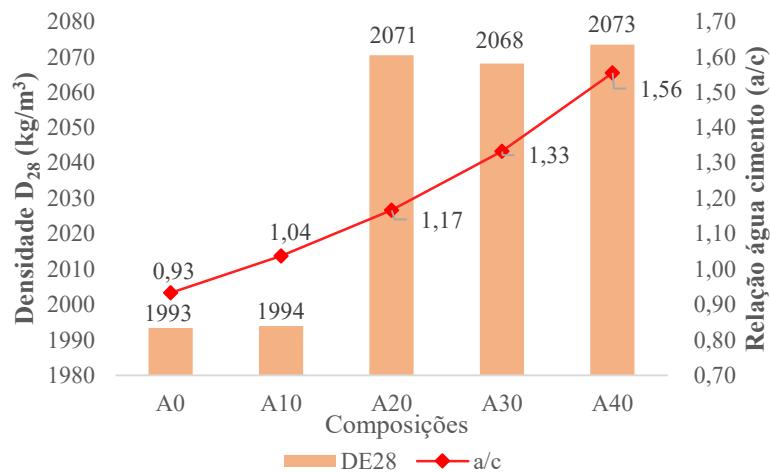
Os comportamentos das densidades de massa das composições analisadas nos três momentos de medições (Df, DE28 e DE91), tem em comum que as densidades aumentam à medida que o teor de substituição do cimento Portland pelo RCC aumenta. Nos três momentos, a composição que apresenta a menor densidade é a argamassa de referência (A0). Na outra extremidade, a argamassa com maior densidade nos três momentos, é a argamassa que possui o maior percentual de substituição, a A40 com 40% de RCC em relação ao cimento Portland composto.

Com relação aos valores acrescentados às densidades das composições de argamassas, tratadas nessa pesquisa, tanto no estado fresco quanto nos estados endurecidos, provocado pelo processo de substituição do cimento Portland composto por RCC, percebe-se que tais modificações são aceitáveis, tecnicamente viáveis para utilização, haja vista não indicam um acréscimo muito grande de peso, nas alvenarias construídas, que incidirá sobre a estrutura que as sustentam.

Por sua vez, quando se compara a densidade de massa no estado endurecido aos 28 dias com a relação água/cimento na Figura 20, percebe-se que à medida que a relação água/cimento aumenta, o comportamento da densidade também aumenta. Se fossemos analisar apenas a relação água/cimento e densidade no estado endurecido, esse comportamento não seria o

esperado. Isso ocorre porque nas composições de argamassas que apresentam uma relação água/cimento maior, teríamos a presença de maior quantidade de água livre, que tem a tendência de ser evaporada, deixando a argamassa endurecida mais porosa, menos densa e com uma resistência à compressão menor.

Figura 20 – Comparação entre a densidade no estado endurecido aos 28 dias (D_{28}) e a relação água cimento em cada composição de argamassa.



Fonte: Pesquisa do aluno.

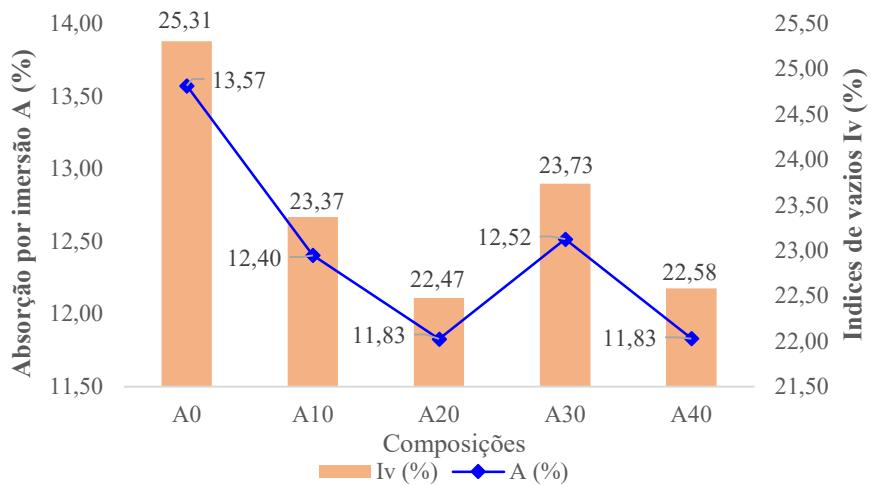
Entretanto, se considerarmos os resultados da substituição do cimento Portland por RCC nas composições de argamassas, no ensaio de densidade de massa no estado endurecido aos 28 dias deduz-se dois comportamentos. Primeiro, é a ocorrência/presença da reação pozolânica entre o RCC (como pozolana) e o hidróxido de cálcio (como produto da hidratação do cimento), que gera novos compostos cimentícios adicionais, aumentando dessa forma, a resistência da argamassa. Segundo, pela ocorrência do efeito filler do RCC que tem a capacidade de promover o preenchimento dos poros vazios na argamassa com minúsculas partículas, deixando a argamassa mais resistente, mais densa e menos porosa.

A Figura 21 representa o comportamento das composições de argamassas em estudo, referentes à realização dos ensaios de absorção de água por imersão total A (%) e dos índices de vazios Iv (%). Graficamente, podemos observar que os comportamentos demonstrados pelos resultados dos ensaios acima mencionados são bastante similares e quando comparados com a argamassa de referência (A0), os valores para A10 e A20 são menores que essa. Posteriormente, há um aumento em A30, comparada a A20, com posterior queda em A40, comparada a A30.

Percebe-se a coerência entre as características de absorção por imersão e os índices de vazios, pois quem absorve mais (nesse caso água), possui mais quantidades de vazios e vice-versa. Logo, a composição que possui maior quantidade de vazios e que absorveu uma

quantidade maior de água foi a composição considerada de referência (A0). Esta é a única que não recebe adição de RCC, demonstrando um efeito da adição de RCC que evidenciam a resistência das composições argamassa à penetração e retenção de líquidos que causam o ganho de peso na alvenaria bem como propiciam uma maior estanqueidade evitando que líquidos penetre no imóvel.

Figura 21 – Comportamento dos resultados da absorção por imersão total A (%) e dos índices de vazios Iv (%) de cada composição de argamassa.



Fonte: Pesquisa do aluno.

Para todas as demais composições que receberam RCC, observou-se uma diminuição de vazios e, consequentemente, uma diminuição de absorção de líquidos, medidos durante a realização dos ensaios. Ou seja, à medida que é realizada a substituição do cimento por RCC ou quando se começa a introduzir o RCC nas composições de argamassas, a estrutura porosa dessas começa a diminuir.

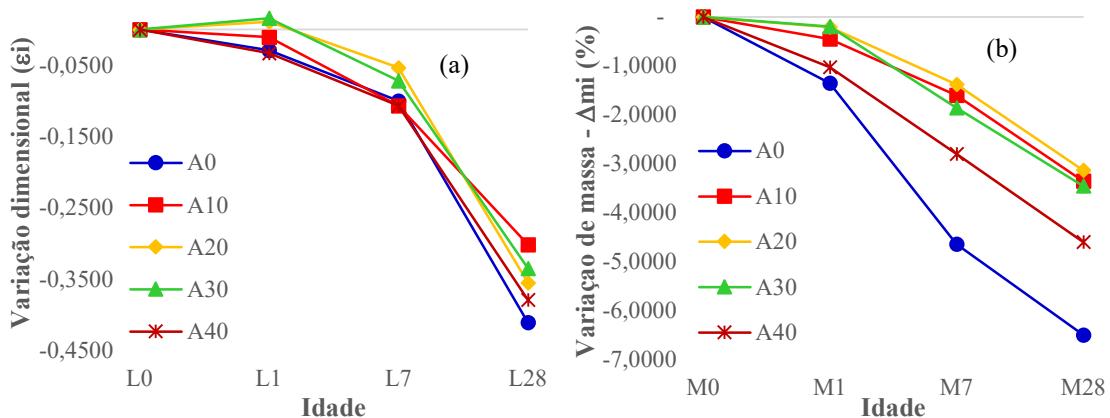
Esses resultados demonstram convergência com as análises realizadas por Gonçalves et al. (2009). Nelas os autores avaliaram o desempenho de argamassas preparadas com (três tipos de argilas calcinadas, sendo). Duas delas eram amostras de metacaulim (MK1 e MK2) e era uma amostra de argila calcinada de tijolo moído (GB). As composições de argamassas foram preparadas com substituições de 0% (argamassa de controle), 10%, 20%, 30% e 40%, do cimento por amostras de argila calcinada (GB, MK1 ou MK2). Nas amostras os pesquisadores analisaram, entre outras características, a porosidade, a absorção, e a distribuição do tamanho dos poros. A substituição de até 30% do cimento por qualquer uma das amostras MK1 e MK2 resultou em uma redução contínua, semelhante na porosidade total. A substituição de 20% e 30% de cimento Portland por GB resultou nas maiores porosidades. Isto pode ser atribuído, em parte, ao melhor empacotamento das misturas e a reação pozolânica entre hidróxido de cálcio e os metacaulins (Gonçalves, et al., 2009).

Tebbal e Rahmouni (2019), por sua vez, analisaram argamassas com pó de caulim calcinado a 800 °C por 3 horas, em que os resultados dos valores de porosidade diminuíram à medida que os níveis de substituição aumentaram para 10%. Os baixos valores de porosidade dos corpos de provas com substituição podem ser atribuídos ao refinamento dos poros, devido ao efeito filler da reação pozolânica (Tebbal; Rahmouni, 2019).

Tais resultados podem ocorrer devido ao rejeito calcinado apresentar uma elevada finura, tamanho de partícula muito pequeno e aos produtos de reação pozolânica (C-S-H), levando a uma diminuição no volume dos poros, bem como a um aumento da quantidade desses, ou seja, poros muito pequenos (Tebbal; Rahmouni, 2019).

Quando passamos a analisar o comportamento das composições de argamassas referentes aos resultados dos ensaios de variação de massa e variação dimensional (ver Figura 22) notamos que no ensaio de variação de massa, as leituras foram muito mais fáceis e precisas de serem realizadas. Já na segunda medição, um dia após a desforma (M1), todos as composições apresentaram redução em suas massas, com a menor diferença apresentada pela composição A30, com uma variação negativa de -0,19% de sua massa. Por sua vez, a argamassa de referência (A0) apresentou a maior redução relativa em sua massa, com -0,45% de perda. Esses resultados iniciais estavam indicando que, as composições que recebiam em sua mistura o RCC, perdiam em menor quantidade ou de forma mais lenta, a água livre de sua combinação.

Figura 22 – Comportamento dos ensaios de variação dimensional (ϵ_i) (a) e variação de massa (Δm_i) (b) entre a desforma e 28 dias após a desforma.



Fonte: Pesquisa do aluno.

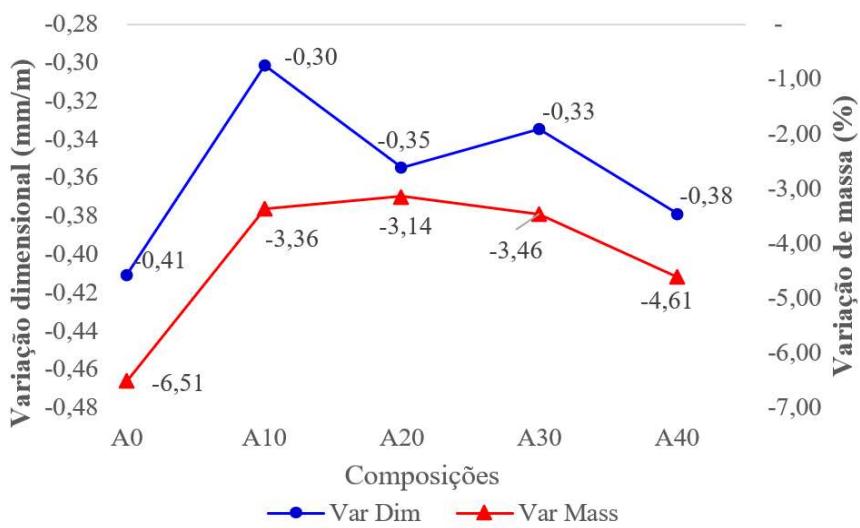
Na idade de 7 dias (M7), as composições sofreram significativas perdas em suas massas. A composição A20 apresentou a menor perda de massa com variação de -1,38%. Por sua vez, a composição de referência (A0) teve uma perda de -4,68%, apresentando a maior variação de sua massa. Já, na idade de 28 dias (M28), a composição A20 tornou a apresentar a menor perda de massa, quando comparada à medição de controle, com perda de massa com variação de -

3,14%. Novamente a composição de referência (A0) apresentou a maior variação em percentual, com perda de -6,51% de sua massa.

Com relação às medições de controle referente ao ensaio de variação dimensional, verificamos que inicialmente, um dia após a desforma (L1), houve uma pequena expansão para as composições A20 e A30. As demais composições A0, A10 e A40 não apresentaram esse comportamento. Ao contrário, essas composições já iniciaram apresentando retração em seus comprimentos.

Na idade de sete dias (L7), observa-se que todos as composições apresentaram retração. As composições de A10 e A40 proporcionaram as maiores variações, ambas com -0,106 mm/m. Nessa idade a menor variação foi registrada pela composição A20, com valor de -0,053 mm/m.

Figura 23 – Comportamento dos ensaios de variação dimensional (ϵ_i) e variação de massa (Δm_i) na idade de 28 dias.



Fonte: Pesquisa do aluno.

Concluindo o ensaio, na idade de 28 dias (L28), todos as composições apresentaram retração livre. A composição A10 registrou a menor variação, com -0,30 mm/m. A composição de referência (A0), por sua vez, apresentou a maior variação com uma retração de -0,41 mm/m.

Fato relevante e considerado positivo é que em todas as composições ora em estudo, apresentaram retracções livres que ficaram dentro do limite definido pela NBR 13281-2 que, para a variação dimensional é de -0,80 mm/m. Ao mesmo tempo, as composições que tiveram o cimento Portland composto substituído pelo RCC registram retracções sempre menores que a alcançada pela argamassa de referência.

Ao analisarmos a Figura 23, que representa as variações dimensional (ϵ_i) e de massa (Δm_i) apenas na idade de 28 dias, percebemos que os resultados das linhas de cada ensaio são equivalentes, exceto pelo fato de que a composição A20 registra um ponto que apresenta a

menor variação de massa (3,14%), mas que registra a terceira maior variação de dimensional com -0,35 mm/m.

Se considerarmos os resultados do ensaio de variação de massa, que é basicamente perda de umidade, perda de água livre, e que a retração é um processo de redução de volume que ocorre na argamassa devida a essa perda de água em excesso presente na mistura, a maior variação de massa, teoricamente indicaria a maior variação linear, fato comprovado empiricamente por essa pesquisa. Entretanto, a adição de RCC à mistura atenuou a retração em todos que foi utilizada.

4.3 O efeito do teor de rejeito de caulim no comportamento mecânico das argamassas de assentamento.

As características mecânicas dos materiais podem ser definidas como a relação entre o comportamento desse material (resposta, deformação, rigidez) e uma força ou carga que esteja sendo aplicada sobre ele. Com relação às composições de argamassas, objeto de estudo dessa pesquisa, essas respostas são medidas pelos ensaios de Resistência à compressão (R_c/fa), Resistência à tração na flexão (R_f), e Módulo de elasticidade dinâmico (E_d).

Com relação à resistência à compressão, foi observado que nas composições em que ocorreu a substituição do cimento Portland por RCC, não houve queda brusca de resistência, ocorrendo inclusive, ganho em torno de 21% da resistência à compressão da composição A20 quando comparada à argamassa de referência (A0). Os demais resultados se mostraram bastante satisfatórios, pois a maior perda de resistência à compressão foi apresentada pela composição A10, com -14,6% de variação negativa dessa característica, mesmo havendo redução do cimento Portland nas misturas dessas composições.

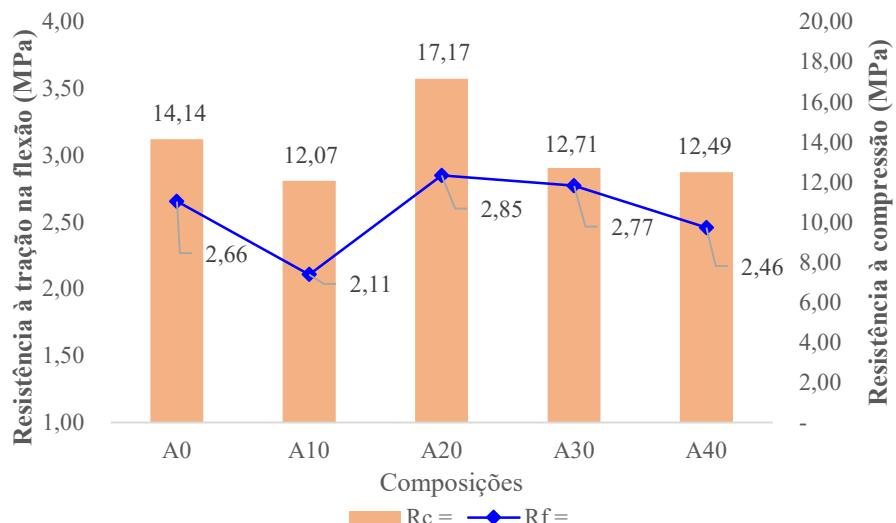
Conforme os valores apresentados na Figura 24, as argamassas em estudo obtiveram valores bem elevados para suas resistências à compressão, ficando todas com média de valores acima de 12 MPa (sendo A0, A10, A30 e A40 com 14,14 MPa, 12,07 MPa, 12,71 MPa e 12,49 MPa, respectivamente), faixa de resistência que as classificam, segundo a NBR 13281-2, como argamassa para alvenaria estrutural, classe AAE12. Por sua vez, a composição de argamassa A20, apresentou valores da resistência à compressão de 17,17 MPa, obtendo a maior média de todas as composições estudadas, e pelo mesmo critério da Norma em questão, foi classificada como argamassa para alvenaria estrutural, classe AAE16.

Com os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, a pesquisa comprova em parte, que o RCC possui propriedades que propiciam boas características aos compósitos

cimentícios, mantendo e por vezes aumentando sua resistência à compressão, podendo ser usado como substituto parcial ao cimento Portland na elaboração de argamassas, que no nosso caso é, para assentamento de alvenaria. E como citado acima, os resultados demonstram ainda que as resistências atingidas pelas composições estão muito próximas, mesmo quando se reduz a proporção de cimento, causada pelo aumentando sua substituição pelo rejeito de caulim calcinado, e pelo consequente aumento da relação água/cimento na composição da argamassa.

Observa-se ainda que, aos 28 dias, com um teor de substituição de 10%, a argamassa perde resistência quando comparada à argamassa de referência, indicando que o material pozolânico não consome toda a portlandita produzida pelo processo de hidratação do cimento Portland. Esses resultados diferem, em parte, dos resultados obtidos por Tebbal e Rahmouni (2019), onde os valores de resistência para as amostras de argamassa com 10% de metacaulim foram maiores do que o controle (0%), aos 28 dias. Pontuando que a dosagem de materiais dos autores era diferente, onde a argila caulinita foi calcinada em uma temperatura mais elevada (à 850°C) pelo mesmo período (3 horas) obtendo um material amorfo mais reativo.

Figura 24 – Comportamento dos ensaios de resistência à tração na flexão (R_f) e resistência à compressão (R_c) das composições de argamassas, realizados na idade de 28 dias.



Fonte: Pesquisa do aluno.

Conforme demonstra a Figura 24, as maiores resistências à compressão só vieram a acontecer em corpos de provas que tiveram na sua composição teor de substituição do cimento Portland composto pelo RCC de 20%. Esse resultado do valor de substituição, está de acordo com os resultados encontrados por Siddique e Klaus (2009) que trabalharam a substituição em concreto. A partir desse ponto de substituição, em nossa pesquisa, as composições de argamassas apresentam novamente, valores médios resistências menores que a argamassa de referência (A0), sendo que a produção de novo (produto de reação pozolânica) C-S-H, está

limitada pela quantidade de portlandita determinada pela proporção de cimento presente na composição.

Por sua vez, a queda de resistência acima do teor de 20% de substituição de cimento Portland por argila calcinada foi similar ao trabalho de Said-Mansour *et al.* (2011), que estudaram a calcinação do caulin local em diversas temperaturas (650–950 C) e durações (2, 3 e 4 h) para produzir MK com alta atividade pozolânica.

Na Figura 24 também estão representados os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão, nas argamassas objetos de estudo dessa pesquisa. Pela análise dos resultados pudemos averiguar que, mesmo com a substituição do cimento Portland composto por RCC, os resultados do ensaio apresentaram variação, mas nada que compromettesse o desempenho das composições estudadas. A exemplo dos resultados do ensaio de resistência à compressão, a composição A10 teve uma pequena baixa de -20,5% quando comparada a argamassa de referência (A0).

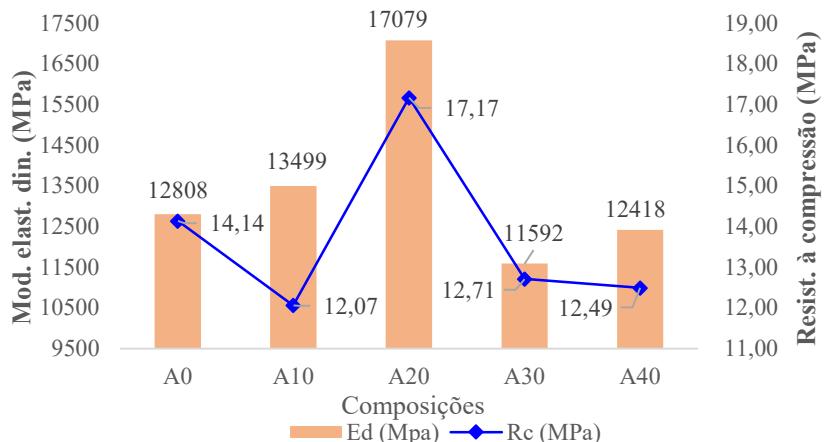
A composição A20, com resistência à tração na flexão de 2,85 MPa, apresenta resistência acima dos valores obtidos pela argamassa de referência (7,35%) e das demais composições, mostrando o quanto o rejeito é indicado para uso em substituição ao cimento Portland, e que esse teor de substituição se comporta como a porcentagem ótima para tal substituição, quando analisada apenas o resultado desse ensaio.

Fato é que, mesmo com a redução da proporção de cimento Portland nas argamassas que sucedem a argamassa de referência, não houve diferenças consideráveis a resistência à tração na flexão entre as composições de argamassas aqui estudada. Isso pode ser confirmado no ensaio realizado no conjunto de argamassas que fizeram parte desse estudo, cujos valores, ficaram entre 1,50 e 3,00 MPa, todas pertencendo à classe R3, conforme determina a norma NBR 13281-1 (ABNT, 2023).

A maior perda de resistência que ocorreu foi com a composição A10, que apresentou uma perda de resistência em torno de 20%, mas que ficou dentro do limite aceitável pela NBR 13281, visto que não caiu sua classificação segundo a mesma norma. Portanto, a substituição de cimento Portland na composição A10 não compromete seu desempenho dentro da finalidade de assentamento e fixação de bloco para alvenaria. O fato é que observamos a pequena redução da resistência à tração na flexão (R_f), quando ocorre a substituição de 10% do cimento Portland por rejeito de caulin calcinado. Esse resultado é similar ao que ocorreu com o estudo de Harbi *et al.* (2017), quando efetuaram a substituição de 5% de cimento por metacaulin resultante de argila calcinada, provocando a imediata queda na resistência à tração na flexão em relação à argamassa controle.

Outro conjunto de resultados de características mecânicas achadas relevantes para comparação e análise nesse estudo são os dados obtidos na realização dos ensaios da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dinâmico. Pelo que demonstra a Figura 25, os resultados obtidos pela argamassa de referência (A0) em ambos os ensaios, se situam em uma posição intermediária comparada aos resultados das outras composições.

Figura 25 – Comportamento dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico (Ed) e de resistência à compressão (Rc / Fa) das composições de argamassas na idade de 28 dias.

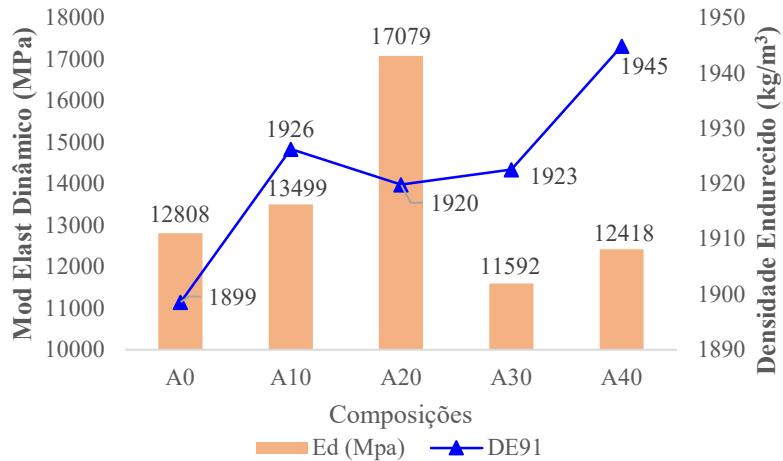


Fonte: Pesquisa do aluno.

Entretanto, foi com a composição A20 que alcançou os maiores resultados em ambos os ensaios (resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico). Como já explicado acima, no ensaio de resistência à compressão, a composição A20, comparada à argamassa de referência (A0), apresentou um incremento de aproximadamente 21,4%, passando de 14,4 MPa, em A0, para 17,1 MPa, em A20. Por sua vez, o módulo de elasticidade, também foi comparado à argamassa de referência onde a majoração se apresentou em torno de 33,3%, aproximadamente 1/3 de acréscimo na rigidez, passando de 12.808 MPa para 17.079 MPa. Para esse último resultado expresso, o ganho alcançado não foi vantajoso, pois ele ficou acima do limite estabelecido como aceitável, sendo classificado como “fora da norma”.

Outra análise comparativa que trazemos para o centro da discussão é a realizada entre a densidade de massa no estado endurecido, aos 91 dias (DE91), como característica física e o módulo de elasticidade dinâmico (Ed), como característica mecânica. O objetivo de realizar essa análise entre ambas as propriedades é verificar se a densidade de massa no estado endurecido aos 91 dias (DE91) de idade, na qual foram realizados ambos os ensaios, possui alguma interferência nos resultados de Ed e se essa interferência é bastante considerável nos resultados obtidos pela realização do módulo de elasticidade dinâmico.

Figura 26 – Comportamento dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico (Ed) e de densidade de massa no estado endurecido (DE) das composições de argamassas na idade de 91 dias.



Fonte: Pesquisa do aluno.

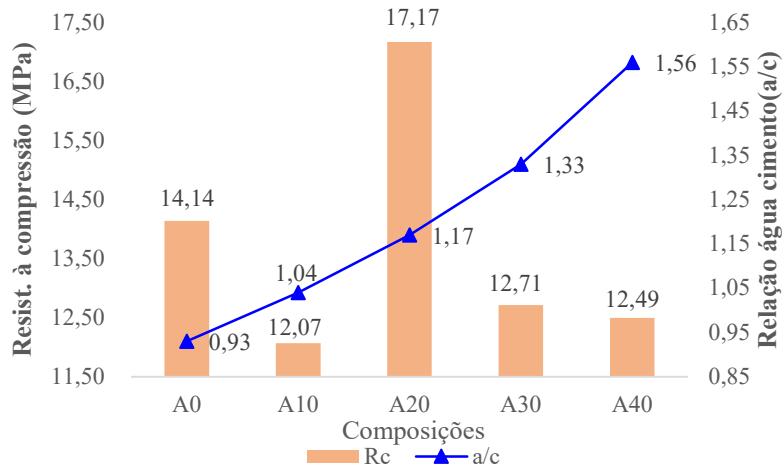
Visualmente, pelo comportamento das linhas do gráfico, é possível perceber que quando a densidade de massa no estado endurecido tende a aumentar com a adição e incremento do teor de RCC nas composições de argamassas, o módulo de elasticidade dinâmico tem um comportamento geral oposto àquele, ou seja, tende a diminuir com a adição e o aumento do teor do RCC nas mesmas composições (Figura 26).

Pelo módulo de elasticidade, o valor alcançado pela argamassa de referência fica no ponto central, comparando este valor aos resultados das demais composições. Já para o ensaio de densidade de massa no estado endurecido aos 91 dias, a argamassa de referência obteve o menor valor de todas as resistências medias obtidas.

Dessa forma e, baseados nas análises comparativas e numéricas, verificamos que os resultados da resistência à compressão (14,14, 12,07, 17,17, 12,71 e 12,49 MPa) têm uma influência muito mais considerável nos resultados do módulo de elasticidade dinâmico (12808, 13499, 17079, 11592 e 12418 MPa) que os resultados do ensaio de densidade de massa no estado endurecido aos 91 dias (1899, 1926, 1920, 1923 e 1945 Kg/m³), medidos nos mesmos corpos de provas e idades que foram realizados ambos os ensaios.

Ao compararmos os resultados do ensaio de resistência à compressão com a relação água/cimento em cada uma das composições, percebemos que enquanto a relação água cimento sempre aumenta, a resistência à compressão apresenta um comportamento aparentemente randômico, não demonstrando qualquer relação com os resultados esperados com a relação água cimento, pois à medida que a relação água/cimento aumenta, o esperado seria que a resistência do compósito diminuisse.

Figura 27 – Comportamento do ensaio de resistência à compressão (R_c) e relação água/cimento (a/c) das composições de argamassas na idade de 91 dias.



Fonte: Pesquisa do aluno.

Entretanto, como percebemos na Figura 27, entre os resultados de A0 e A10 existe uma queda de aproximadamente 14,6%. Ela é considerada aceitável e tecnicamente viável para uso, considerando a diminuição da quantidade de cimento e aumento da relação água/cimento. Mas da composição A10 para a A20, ocorre um incremento de resistência que ultrapassa, inclusive, a resistência da argamassa de referência A0 em 21,4%. Com os valores relativos de queda de resistência das demais composições (A30 com 10%, e A40 com 11,6%) fica evidente que a adição do RCC gera efeitos positivos nas composições de argamassas estudadas, para essa característica, diminuindo o uso de cimento Portland.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho, que tem como título “Estudo da influência do rejeito de caulim calcinado (RCC) nas propriedades de argamassas para assentamento”. O estudo permitiu ampliar o entendimento sobre a interação entre o rejeito de caulim calcinado e o cimento Portland utilizado na pesquisa, assim como, e que os objetivos desta pesquisa fossem alcançados.

5.1 CONCLUSÕES.

Para avaliar o efeito da substituição parcial do cimento Portland composto (CP II-F-32) por rejeito de caulim calcinado à 600 °C e moído, dividimos a análise em três partes distintas, sendo essas o comportamento reológico, as características físicas e as respostas aos estímulos (comportamento mecânico) das composições de argamassas para assentamento e fixação de alvenaria.

Com relação ao comportamento da trabalhabilidade das composições de argamassas estudadas, concluímos que à medida que o teor de substituição aumenta nas composições de argamassas A0 a A30, estas ganham fluidez e o IC aumenta, evidenciando a característica plastificante do RCC até a proporção A30. Por outro lado, quando o percentual de substituição passa de 30% para 40%, ocorre perda de plasticidade por parte da argamassa A40, com ressecamento e diminuição do IC.

Além disso, o RCC proporcionou a diminuição da exsudação e/ou segregação, nas argamassas atribuindo a todas as composições “boa coesão”, apesar da redução da quantidade de aditivo plastificante.

Em todas as composições de argamassas com substituição do cimento Portland, entre 25 e 30 minutos após a realização do ensaio de IC, apresentaram perda de fluidez e ressecamento aparente.

Em todos os casos de substituição, as argamassas apresentaram boas homogeneidade, com uniformidade, sem sinais de segregação entre a pasta, o agregado miúdo e a água de amassamento.

Com relação ao comportamento físico constatamos que, à medida que ocorre o processo de substituição do cimento Portland pelo RCC e essa substituição aumenta, as densidades de massas no estado fresco e no estado endurecido, também aumentam.

Essas não apresentaram grandes diferenças e são considerados aceitáveis pela pesquisa. Portanto, por esse efeito, o incremento pode ser realizado sem prejuízo nas características,

gerando economia de cimento sem perda da qualidade do compósito empregado no assentamento das unidades de alvenaria.

Inversamente aos resultados da “densidade de massa no estado fresco”, o “teor de ar incorporado” diminuem à medida que a substituição do cimento Portland composto por RCC aumenta. Os resultados desse ensaio ficaram abaixo dos limites máximos exigidos em norma para argamassa para assentamento e fixação alvenaria sem função estrutural e com função estrutural, e considerados bons pela pesquisa.

À medida que ocorre ou aumenta o teor de substituição do cimento Portland pelo RCC, há uma clara tendência de crescimento do percentual de retenção de água, medidos pelo ensaio. Esses resultados são considerados bons, pois com perda pequena de água pela argamassa, beneficia às reações causadas pela hidratação do cimento presente na argamassa e a reação pozolânica entre os produtos da hidratação do cimento (portlandita) e o RCC.

Com a substituição e o aumento do teor de substituição de cimento por RCC, os valores do ensaio de absorção de água por imersão total e dos índices de vazios diminuem. O RCC proporciona menor quantidade de vazios e menor absorção de água. Pela literatura, a menor absorção pelas composições que tiveram RCC em sua mistura, indica que ocorre o refinamento dos poros nas composições argamassas em seu estado endurecido. Esses efeitos são considerados bons pela pesquisa.

Com relação à variação de massa, os resultados indicaram que as composições de argamassas que receberam em sua mistura o RCC, perderam em menor quantidade ou de forma mais lenta, a água livre de sua combinação propiciando a formação de produtos da hidratação do mento. E à medida que a substituição aumentava, as amostras perdiam menos massa, comprovando a geração de novos compostos cimentícios e/ou preenchimento dos poros pelo efeito filler do RCC, que atribui ao compósito maiores resistência e durabilidade.

Na variação dimensional dos corpos de provas, todos as composições apresentaram retração livre, que a composição de referência, apresentou a maior variação, e A10 a menor variação. Todas as composições que receberam RCC ficaram com retrações menores que a argamassa de referência e todas as composições ficaram com suas retrações abaixo do limite estipulado pela norma, indicando que com o uso do RCC, tensões menores deverão ser geradas na interação entre a argamassa, os elementos de alvenaria e a estrutura que sustenta a alvenaria. Fato considerado muito bom pela pesquisa.

Para além de tais resultados positivos, podemos concluir ainda que a substituição do cimento Portland por RCC leva à redução de custos para a produção de um metro cúbico (m^3) de argamassa, onde só na argamassa de referência se economizaria cerca de 22,3 kg de cimento

por m³ e com uma perspectiva de economia de quase dois sacos de cimento de 50 kg em cada m³ de argamassa de A40 produzido, quando comparado à argamassa de referência A0. Além do mais, a utilização de RCC na mistura de argamassas reduz o consumo de cimento e, consequentemente, diminui o descarte do rejeito no meio ambiente. Dessa forma, atende-se à necessidade de redução do consumo de cimento nos compósitos com a utilização de resíduos calcinado que é uma alternativa ecologicamente correta.

Com relação ao comportamento mecânico, foi observado que à medida que ocorreu a substituição do cimento Portland por RCC, não houve queda brusca de resistência à compressão nas composições de argamassas. Ocorreu inclusive, ganho em 21% da resistência à compressão da composição A20, quando comparada à argamassa de referência. Conclui-se, portanto, que as composições podem receber uma dosagem de cimento mais pobre (menor quantidade de cimento), economizando esse produto e como consequência diminuindo a emissão de CO₂.

Os demais resultados se mostraram bastante satisfatórios e tecnicamente viáveis, com a maior perda de resistência à compressão sendo 14,6% na composição A10. E mesmo com essa perda de resistência, a classe da argamassa não caiu no critério de classificação apresentado pela NBR 13281. Esses resultados foram considerados satisfatórios e bons pela pesquisa.

O RCC possui propriedades que propiciam boas características aos compósitos cimentícios, mantendo e por vezes, aumentando sua resistência à compressão, podendo ser usado como substituto parcial ao cimento Portland na elaboração de argamassas para assentamento de alvenaria.

Foi constatado que as maiores respostas em resistências à compressão e à tração na flexão aconteceram nos corpos de provas com 20% de substituição com a produção de novos produtos cimentícios C-S-H, limitada à quantidade de portlandita determinada pela proporção de cimento presente na composição. Por outro lado, a maior perda de resistência à tração na flexão ocorreu na composição A10 (com 20% de perda), considerada aceitável pela pesquisa, visto que ficou dentro do limite aceitável pela NBR 13281, pois o resultado não deixou que caísse a classificação da composição segundo a norma.

No ensaio de módulo de elasticidade dinâmico ficou demonstrada a ocorrência de maior rigidez na composição A20, que apresentou um incremento em torno de 21,4%, quando comparada à argamassa de referência. Ao mesmo tempo, a argamassa de composição A20 conseguiu atingir os mais altos valores para os ensaios mecânicos (resistência à tração na flexão, resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico). Entretanto, tais resultados não são em tudo bom, pois com o resultado do “módulo de elasticidade dinâmico” essa composição

apresentou uma rigidez muito elevada, ficando classificada como fora de norma, não sendo indicada seu uso na construção civil.

Considerando todos os resultados referentes a trabalhabilidade no estado fresco, aos comportamentos físicos e mecânicos nos ensaios das composições de argamassas, acredita-se que o teor de substituição é de 20%.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

No que diz respeito à pesquisa realizada neste trabalho, foi avaliado o efeito da substituição parcial do cimento Portland composto por rejeito de caulim calcinado a 600 °C e moído sobre os comportamentos reológico, físico e mecânico de argamassas de assentamento. Nesse sentido, ainda há que se investigar as características plastificantes do rejeito de caulim calcinado em qualquer temperatura ou em sua forma in natura.

Considerando a perda de fluidez e ressecamento aparente apresentado entre 25 e 30 minutos após a realização do ensaio de IC, pelas composições de argamassas nas quais foram realizadas as substituições de cimento por RCC, entende-se que é importante desenvolver estudos em campo para analisar estas perdas observadas.

Considerando que a pesquisa foi realizada em argamassas com uma dosagem 1:6 (aglomerante/agregado miúdo), percebeu-se que há a possibilidade de pesquisas em argamassas com uma dosagem mais pobre (1:7, 1:8 e 1:9), visto que a rigidez ficou muito elevado na composição A20, mesmo que os demais resultados mecânicos tenham se mostrado bastante elevados ou satisfatórios.

Ao mesmo tempo, há a necessidade de serem aprofundadas as pesquisas referentes ao ensaio de absorção de água por imersão total (em argamassas no estado endurecido) para verificar o comportamento de aumento nessa característica física, na composição A30.

Por outro lado, quanto ao uso do rejeito de caulim calcinado, há possibilidades de pesquisa sobre a dosagem ideal deste produto em substituição ao cimento Portland em argamassas, que possivelmente estará entre as composições A10 e A30, subdividindo em adições menores, como por exemplo de 5 em 5%.

Portanto, este é um campo de análise que se mostra bastante promissor e as possibilidades de pesquisa são várias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-SHAFY, Hussein I.; MANSOUR, Mona S. M. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. **Egyptian journal of petroleum**, v. 27, n. 4, p. 1275-1290, 2018.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, RJ. 2004.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11172: **Aglomerantes de origem mineral – Terminologia**. Rio de Janeiro, RJ. 1990.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: **Materiais pozolânicos – Requisitos**. Rio de Janeiro, RJ. 2014.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, RJ. 2016.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13277: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água**. Rio de Janeiro, RJ. 2005.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, RJ. 2005.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, RJ. 2005.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13280: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. Rio de Janeiro, RJ. 2005.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281-1: **Argamassas inorgânicas - Requisitos e métodos de ensaios. Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos**. Rio de Janeiro, RJ. 2023.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281-2: **Argamassas inorgânicas - Requisitos e métodos de ensaios. Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria.** Rio de Janeiro, RJ. 2023.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13528-1: **Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração.** Rio de Janeiro, RJ. 2019.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13529: **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia.** Rio de Janeiro, RJ. 2013.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15258: **Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração.** Rio de Janeiro, RJ. 2021.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15261: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear).** Rio de Janeiro, RJ. 2005.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-1: **Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro, RJ. 2024.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15630: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica.** Rio de Janeiro, RJ. 2008.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16372: **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine).** Rio de Janeiro, RJ. 2015.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16541: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios.** Rio de Janeiro, RJ. 2016.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: **Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, RJ. 2017.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: **Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, RJ. 2018.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: **Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, RJ. 2021.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: **Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios.** Rio de Janeiro, RJ. 2021.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ. 2022.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5751: **Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias.** Rio de Janeiro, RJ. 2015.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: **Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, RJ, 2014.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6467: **Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2009.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto – Requisitos.** Rio de Janeiro, RJ. 2022.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: **Areia normal para ensaio de cimento – Especificação.** Rio de Janeiro, RJ. 2015.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, RJ. 2019.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9775: **Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ. 2011.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, RJ. 2005.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 18: **Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro, RJ. 2012.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, RJ. 2003.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, RJ. 2006.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, RJ. 2009.

AGUIAR NETO, Sabino Alves de. **Produção de argamassas com aproveitamento de resíduos de polímeros etilenos e propilenos como materiais de construção civil.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2020.

AKHTAR, Muhammad Zaheer et al. How do industrial ecology, energy efficiency, and waste recycling technology (circular economy) fit into China's plan to protect the environment? Up to speed. **Recycling**, v. 7, n. 6, p. 83, 2022.

AL-JABARI, Maher. **Integral Waterproofing of Concrete Structures: Advanced Protection Technologies of Concrete by Pore Blocking and Lining.** Woodhead Publishing, 2022.

ALMEIDA, Raphael Augusto; ALVES, João Batista Alves Batista. Avaliação dos impactos socioambientais causados pela mineração de caulim em Municípios do estado da Paraíba e Rio Grande do Norte. **AGROPECUÁRIA CIENTÍFICA NO SEMIÁRIDO**, v. 16, n. 4, p. 205-212, 2021.

ALUJAS, Adrian et al. Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. **Applied Clay Science**, v. 108, p. 94-101, 2015.

ARIZZI, Anna; CULTRONE, Giuseppe. Mortars and plasters – how to characterise hydraulic mortars. **Archaeological and Anthropological Sciences**, v. 13, n. 9, p. 144, 2021.

ARNESEN, William; GLENNERSTER, Rachel. **Market Shaping to Combat Climate Change.** National Bureau of Economic Research, 2023.

ARRUDA JUNIOR, Euler Santos; BARATA, Márcio Santos; SECCO, Pedro; CARVALHO, Elias Soares. The use of red mud and kaolin waste in the production of a new building material: pozzolanic pigment for colored concrete and mortar. **Revista Matéria**, v. 27, n. 3, Rio de Janeiro, 2022.

BARATA, M. S. **Aproveitamento dos resíduos cauliníticos das indústrias de beneficiamento de caulim da região Amazônia como matéria-prima para fabricação de um material de construção (pozolanas)**. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Pará, Belém/PA, 2007.

BARBOSA, A. A.; SÁ, C. F. S.; BARROSO, J. V.; LIMA, R. C. O.; LEAL, J. P. C. Aproveitamento do resíduo de caulim na produção do concreto sem fins estruturais. In **Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental - VII**, Anais, Campina Grande – PB. 2016

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção**. Coordenação João Fernando Dias. - 6. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2019. *E-book*.

BLOODWORTH, Andrew; WRIGHTON, Chloe; HIGHLEY, David; BATE, Richard. Mineral planning factsheet : kaolin. British Geological Survey, 2009. 7pp. (Mineral planning factsheet) (Unpublished)

BONCZYK, M.; RUBIN, J. The application of coal mining waste to the production of construction ceramics: radiological and mechanical aspects. **Materiales de Construcción**, v. 72, n. 348, p. e300-e300, 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (2023). **Estudos para o Plano Nacional de Mineração 2050**. (Em editoração). Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pnm-2050/estudos/caderno-2-pesquisa-e-producao-mineral/EstudosMSWordPNM2050Caderno220221116_Vol.II.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2023.

BRICK DEVELOPMENT ASSOCIATION. Mortar for Brickwork: Technical Guide. London, Last update: abril 2023. Disponível em: <<https://www.brick.org.uk/uploads/downloads/08.-Mortar-for-Brickwork-Technical-Guide-2023.f1678701358.pdf>>. Acesso em: 11 jun. 2023.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL - CEF. **Cadernos Técnicos de Composições para Argamassas**. Última atualização: 12/2023. Brasil, 2023. Disponível em:

https://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-composicoes-aferidas-lote1-habitacao-fundacoes-estruturas/SINAPI_CT_ARGAMASSAS_12_2023.pdf

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 10. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2020. *E-book*.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: GERALDO CECHELLA ISAIA. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 1. Ed. São Paulo: Ibracon, 2007. v.2, p. 863-904.

CARMO, Flávio F.; LANCHOTTI, Andressa O.; KAMINO, Luciana HY. Mining waste challenges: environmental risks of gigatons of mud, dust and sediment in megadiverse regions in Brazil. **Sustainability**, v. 12, n. 20, p. 8466, 2020.

CASSAGNABÈRE, Franck et al. Impact of metakaolin characteristics on the rheological properties of mortar in the fresh state. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 95-107, 2013.

CHAVES, P. S. **Argamassa autonivelante com adição mineral (fíber) de resíduo de beneficiamento de mármore e granito.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2018.

CHEN, Ning WANG, Peiming; ZHAO, Liqun; ZHANG, Guofang. Water retention mechanism of HPMC in cement mortar. **Materials**, v. 13, n. 13, p. 2918, 2020.

CHRIST, Roberto; TUTIKIAN, Bernardo F.; HELENE, Paulo. Concreto de ultra alto desempenho – UHPC: Fundamentos, propriedades e dosagem. **Editora LEUD, São Paulo**, 2022.

CHUDLEY, Roy; GREENO, Roger; KOVAC, Karl. **Chudley and Greeno's Building Construction Handbook.** Routledge, 2020.

CLAUSELL, Joan Romero; SIGNES, Carlos Hidalgo; SOLÀ, Gabriel Barbeta; LANZAROTE, Begoña Serrano. Improvement in the rheological and mechanical properties of clay mortar after adding Ceratonia Siliqua L. extracts. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117747, 2020.

COURARD, Luc et al. Durability of mortars modified with metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 9, p. 1473-1479, 2003.

DE OLIVEIRA GOMES, Adailton; NEVES, Célia Maria Martins. Proposta de método de dosagem racional de argamassas contendo argilominerais. **Ambiente Construído**, v. 2, n. 2, p. 19-30, 2002.

DE OLIVEIRA LIMA, Rosa do Carmo. Diagnóstico dos impactos ambientais decorrentes do beneficiamento de caulim no município de Equador-RN. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 10, n. 2, p. 91-96, 2010.

DOS SANTOS, White José; BARBOSA, Maria Teresa Gomes; GALIL, Vinicius Martins; CARRASCO, Edgar Vladimiro Mantilla, DE REZENDE, Marco Antônio Penido; ALVES, Rejane Costa; CARVALHO, Eliene Pires. Proposal Mixes Process Method for Masonry Structure Laying Mortar. **Journal of Management and Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 169-182, 2023.

DUBIŃSKI, Józef. Sustainable development of mining mineral resources. **Journal of Sustainable Mining**, v. 12, n. 1, p. 1-6, 2013.

ENGELHARDT, Juliana Layber Mota, ENGELHARDT, Henrique. **Análise das propriedades químicas de calcários calcíticos para indústria siderúrgica**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 03, Vol. 08, pp. 125-135. Março de 2019. ISSN: 2448-0959.

FARIAS, J. O. G. **Perfil da mineração de caulim. Relatório técnico no 39 do Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia – Projeto Estal**. Brasília: SGM/MME; BIRD, 2009. 61 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/relatorios-de-apoio-ao-pnm-2030-projeto-estal-1/a-mineracao-brasileira/documentos/relatorio-nº39_-perfil-do-caulim.doc/view>

GONÇALVES, J. P. et al. Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1971-1979, 2009.

GOUVELLO FILHO, Soares. Nassar (2010). **Estudo de Baixo Carbono para o Brasil-Uso da Terra, Mudanças do Uso da Terra e Florestas**, BIRD/Banco Mundial, 2010.

GUBINA, Victoria et al. Differences in the generation of industrial waste from economic activities in Ukraine and the EU and the prospects for the integrated use of mineral raw materials. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2021. p. 09008.

HARBI, Radhia; DERABLA, Riad; NAFA, Zahreddine. Improvement of the properties of a mortar with 5% of kaolin fillers in sand combined with metakaolin, brick waste and glass powder in cement. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 632-641, 2017.

HELA, Rudolf; MARŠÁLOVÁ, Jana. Study of Meta Kaolin Influence on Rheological Properties of Cement Mortars. **Annual Transactions of the Nordic Rheological Society**, v. 17, p. 1-4, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. Desempenho da mineração tem queda em 2022, mas setor cria mais empregos e aumentará investimentos para US\$ 50 bi até 2027. Disponível em: <<https://ibram.org.br/noticia/desempenho-da-mineracao-tem-queda-em-2022-mas-setor-cria-mais-empregos-e-aumentara-investimentos-para-us-50-bi-ate-2027/>>.

Acessado em 18 set. 2023.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas: Relatório de Pesquisa.** Brasília, 2012. Disponível em:

https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagn%C3%B3stico_2012.pdf.

Acesso em 10 jan. 2023.

IRASSAR, E. F.; BONAVETTI, V. L.; MENÉNDEZ, G.; CARRASCO, M. F. Hidratação e propriedades de cimentos compostos (com três adições) com filer calcário e escória. **Rev. ALCONPAT**, Mérida, v. 5, n. 2, p. 84-96, agosto 2015. Disponível em <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352015000200084&lng=es&nrm=iso>. Acessado em: 06 fev. 2023.

JARDIM, P. K. S.; PAVAN, L. D. O mercado sustentável e a valorização do ecoproduto: algumas perspectivas. v. 07, nº 2, p. 123-137, JUL-DEZ, 2014. Revista Eletrônica “**Diálogos Acadêmicos**” (ISSN: 0486-6266)

KHATIB, Jamal M.; CLAY, Roger M. Absorption characteristics of metakaolin concrete. **Cement and concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 19-29, 2004.

LAWRENCE, P.; RINGOT, E.; HUSSON, B. About the measurement of the air content in mortar. **Materials and structures**, v. 32, p. 618-621, 1999.

LOPES, Livia de Faria. Materiais de construção civil I. **Londrina-PR: Editora e Distribuidora Educacional SA**, 2017.

LUZ, A. B.; CAMPOS, A. R.; CARVALHO, E. A., BERTOLINO, L. C. e SCORZELLI, R. B. Argila - Caulim. In: **Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações**. Ed. LUZ, A.B. e LINS, F.A.F. CETEM/MCT. Rio de Janeiro. p. 255-294. 2008.

MÁRTIRES, R. A. C. Caulim. **BRASIL, Departamento Nacional De Produção Mineral. Economia Mineral do Brasil. DNPM**, p. 442-451, 2009.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3^a Edição. São Paulo: IBRACON, 674 p, 2008.

MELO, V. A. R. **Utilização do resíduo gerado na exploração do itabirito em substituição ao agregado miúdo natural para preparação de argamassa de cimento Portland**. 2012. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

MIKULČIĆ, Hrvoje; VON BERG, Eberhard; VUJANOVIĆ, Milan; PRIESCHING, Peter; PERKOVIĆ, Luka; TATSCHL, Reinhard; DUIĆ, Neven. Numerical modelling of calcination reaction mechanism for cement production. **Chemical Engineering Science**, v. 69, n. 1, p. 607-615, 2012.

MOHAMED, Osama; AHMED, Eman; NAJM, Omar; AL-ARIIBE, Khaled; HIJAH, Esraa. **Water absorption characteristics and rate of strength development of mortar with slag-based alkali-activated binder and 25% fly ash replacement**. Materials Today: Proceedings, 2023.

MPA Mineral Products Association. Essential materials sustainable solutions. **LT12 Rendering mortar: Properties of rendering mortar**, 2023b, 9 p. Disponível em: <<https://mortar.org.uk/documents/LT12-RenderingMortar.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

MPA Mineral Products Association. Essential materials sustainable solutions. **LT06 Masonry-Mortar: Properties of Masonry Mortar**, 2023a, 8 p. Disponível em: <<https://mortar.org.uk/documents/LT06-Masonry-Mortar.pdf>>. Acesso em: 02 jan. 2024.

NEVES, K. P.L., MELO FILHO, J. A. Produção de metacaulinita a partir de caulim da região de presidente Figueiredo, AM. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**, Manaus, n. 75, p. 1-5, 2018.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto / A. M. Neville, J. J. Brooks: tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NOTA TÉCNICA: Valores de referência para o potencial de aquecimento global (GWP) dos gases de efeito estufa – versão 2.0. Programa Brasileiro GHG Protocol. São Paulo, FGV EAESP, 2022.

NUHU, Sanusi; LADAN, Samaila; MUHAMMAD, Abubakar Umar. Effects and control of chemical composition of clinker for cement production. **International Journal of Control Science and Engineering**, v. 10, n. 1, p. 16-21, 2020.

RAGHAV, Muralidharan; PARK, Taejoon; YANG, Hyun-Min; LEE, Seung-Yeop; KARTHICK, Subbiah; LEE, Han-Seung. Review of the effects of supplementary cementitious materials and chemical additives on the physical, mechanical and durability properties of hydraulic concrete. **Materials**, v. 14, n. 23, p. 7270, 2021.

RAMACHANDRAN, Vangipuram Seshachar; BEAUDOIN, James J. **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques and applications**. Elsevier, 2000.

REVUELTA, Manuel Bustillo. **Construction Materials: Geology, Production and Applications**. Springer Nature, Switzerland. 2021. 602p.

ROCHA, Neuza Evangelista Pereira. **Estudo da utilização de resíduos industriais de lâcerâmica e lâ de vidro em argamassas e concretos**. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011.

RODRIGUES MENEZES, Romualdo et al. Recycling of granite industry waste from the northeast region of Brazil. **Environmental Management and Health**, v. 13, n. 2, p. 134-141, 2002.

RODRIGUES, Alisson Mendes et al. Development of Eco-Friendly Mortars Produced with Kaolin Processing Waste: Durability Behavior Viewpoint. **Sustainability**, v. 13, n. 20, p. 11395, 2021.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and concrete composites**, v. 23, n. 6, p. 441-454, 2001.

SAID-MANSOUR, Mohamed et al. Influence of calcined kaolin on mortar properties. **Construction and building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2275-2282, 2011.

SANDIN, Kenneth. Mortars for masonry and rendering. **Lunds Universitet**. ISSN, p. 1100-9446, 1995.

SANTOS, R. C. V. Contribuição do setor mineral no Produto Interno Bruto brasileiro. **Revista RADAR**, v. 65. Brasília, 2021.

SANTOS, Tiago Assunção; ANDRADE NETO, José da Silva; RIBEIRO, Daniel Véras. Processo de produção e tipos de cimentos. **Ribeiro, DV, Princípio da Ciência dos Materiais Cimentícios: Produção, Reações, Aplicações e Avanços Tecnológicos, Curitiba, Appris**, 2021.

SHVARZMAN, Akovler et al. The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite. **Cement and concrete research**, v. 33, n. 3, p. 405-416, 2003.

SIDDIQUE, Rafat; KLAUS, Juvas. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**, v. 43, n. 3-4, p. 392-400, 2009.

SILVA, L.; PICANÇO, M. S. Análise investigativa sobre o uso de resíduo de caulim para a produção de compósitos cimentícios. ISSN 1517-7076, **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, 2022.

SILVA, Luzilene S.; OLIVEIRA, Andrielli M. de; PICANÇO, Marcelo de S.; Sabino A. de A. Neto, Josino. R. N. T. Vianna, Renan B. Macedo. **Carbonatação acelerada em argamassa com resíduo de caulim da Amazônia**, in 5º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto. DEGRADA 2023 - UFG, Goiânia/GO, Brasil Oswaldo Cascudo, Andrielli Morais de Oliveira, Helena Carasek (Eds).

SILVA, Luzilene Souza. **Estudo de viabilidade técnica de utilização de um cimento composto por adições de resíduo de caulim da Amazônia para a produção de argamassa e concreto**. 2024. 130f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2024.

SIQUEIRA, Jacilene Siqueira de. **Reciclagem de Resíduo a partir de Cinzas de carvão Mineral: Produção de Argamassas**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Pará. Belém, 2011.

SIQUEIRA, Tahís Pinto Lobo, et al., Reologia das matrizes cimentícias. **Ribeiro, DV, Princípio da Ciência dos Materiais Cimentícios: Produção, Reações, Aplicações e Avanços Tecnológicos, Curitiba, Appris**, 2021.

SOUZA, Sabrina Maia; BRITO, André Luiz Fiquene; MUNIZ, Ana Cristina Silva; SILVA JUNIOR, Mario Gomes. Reaproveitamento de resíduos sólidos de granito e caulim e avaliação de materiais estabilizados e solidificados. In: **I CONAPESC - Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências**, 2016, Campina Grande. 2016.

SPACOV, Isabel Cristina Guerra et al. Dosimetria externa em minas de caulim na região do Seridó do Nordeste do Brasil. **Cerâmica**, v. 64, p. 133-140, 2018.

TEBBAL, Nadia; RAHMOUNI, Zine El Abidine. Rheological and mechanical behavior of mortars with metakaolin formulation. **Procedia Computer Science**, v. 158, p. 45-50, 2019.

TING, Matthew Zhi Yeon; YI, Yaolin. Durability of cementitious materials in seawater environment: A review on chemical interactions, hardened-state properties and environmental factors. **Construction and Building Materials**, v. 367, p. 130224, 2023.

TORQUATO, Frederico Campos Regazoni. **Sustentabilidade no reaproveitamento de resíduos de mineração: uma revisão sistemática sobre as diferentes técnicas**. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade) - Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade (PPGS), Centro de Economia e Administração (CEA), Pontifícia Universidade Católica, Campinas, 2022.

US, Department of energy (DOE). Pathways to Commercial Liftoff: Low-Carbon Cement. 2023. Disponível em: <<https://liftoff.energy.gov/wp-content/uploads/2023/09/20230918-Pathways-to-Commercial-Liftoff-Cement.pdf>>. Acesso em: 31 dez. 2023.

VIANA, Fernando Luiz Emerenciano. Economia circular e gestão de resíduos sólidos: perspectivas para o Brasil e o Nordeste. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 52, n. 1, p. 9-25, 2021.

VIVEIROS, Danielle de Cássia Santos de. **Rejeito do minério de manganês como material de construção civil**. 2017.103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/9843>. Acesso em: 20 jul. 2021.

WA Kaolin, 2020 Production of High Purity Kaolin From One of the World's Largest Resources.

WWF - WWF Brasil. Disponível em <http://www.wwf.org.br> (Acesso em 17/10/2023).

YOUNG, David. Mortars: materials, mixes and methods. A guide to repointing mortar joints in older buildings. **Heritage Councils of New South Wales**, Queensland, South Australia, Tasmania, Western Australia and Victoria, Melbourne, 2021.

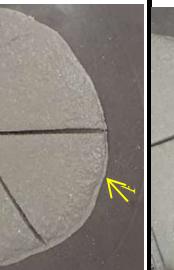
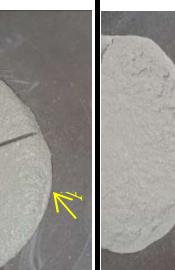
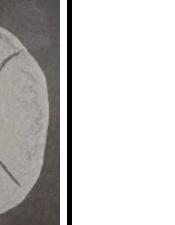
ZHANG, Tianyu. **Landfill Earth: A Global Perspective on the Waste Problem**. Master Thesis. University of Barcelona. 2020.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Tabelas de análise.

Nesse apêndice serão apresentados os quadros utilizados para a realização da análise dos resultados das argamassas referente ao teor de substituição, traço utilizado, índice de consistência de cada composição, com análise de coesão, plasticidade e aspectos visuais, e aos efeitos do teor de resíduo no “comportamento físico” das argamassas de assentamento;

A-A-1 Quadro referente ao teor de substituição, traço utilizado, índice de consistência de cada composição, com análise de coesão, plasticidade e aspectos visuais.

% de resíduo	Traço (*)	Índice de Consistência	Coesão	Plasticidade	Aspecto em imagens					
					Exsuda	Segrega	Seca	Fluída	Plástica	Seca
A0 (0%)	1:0:6:0,93 (0,40%)	Média = 243,33	Exsuda	\$						
	1:6:0,93 (0,40%)	IC = 243 mm	Segrega	N						
A10 (10%)	1:0:11:6,67:1,04 (0,40%)	Média = 245,00	Exsuda	N						
	1:6:0,93 (0,36%)	IC = 245 mm	Segrega	N						
A20 (20%)	1:0,25:7,50:1,17 (0,40%)	Média = 245,67	Exsuda	N						
	1:6:0,93 (0,32%)	IC = 246 mm	Segrega	N						
A30 (30%)	1:0,43:8,57:1,33 (0,40%)	Média = 246,67	Exsuda	N						
	1:6:0,93 (0,28%)	IC = 247 mm	Segrega	N						
A40 (40%)	1:0,67:10:1,56 (0,40%)	Média = 232,67	Exsuda	N						
	1:6:0,93 (0,24%)	IC = 233 mm	Segrega	N						

Fonte: pesquisa do aluno.

Coesão: (exsudação, segregação); Plasticidade (fluída, plástica, seca).

A-A-2 Quadro referente ao efeito do teor resíduo no comportamento físmico das argamassas de assentamento.

Ensaios	Comportamento nas composições	Escala				Classificação				
		A0	-2	-1	0	+1	+2	A0	Ruim	Aceitável
Densidade de massa no estado fresco (DF)	2110 2090 2070 2050 2030	2109 2105 2093 2068 2039	A10 A20 A30 A40 A10 A20 A30 A40	-2 -2 -1 -2 -1 -2 -1 -2	-1 0 0 -1 0 -1 0 -1	0 0 +1 0 +1 0 +1 0	+1 +1 +2 +1 +2 +2 +1 +2	A10 A20 A30 A40 A10 A20 A30 A40	Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim	Aceitável Boa Boa Boa Boa
Idade: 0 dias										
Unidade: kg/m ³ .										
Teor de ar incorporado (A).	7,30 6,30 5,30 4,30	7,99 6,56 3,24 4,67 4,38	A0 A10 A20 A30 A40 A10 A20 A30 A40	-2 -2 -2 -2 -2 -2 -1 -1 -1	-1 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 0	0 0 0 0 0 0 +1 +1 +1	+1 +1 +2 +1 +2 +2 +1 +2 +2	A0 A10 A20 A30 A40 A10 A20 A30 A40	Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim	Aceitável Boa Boa Boa
Idade: 0 dias										
Unidade: %.										
Densidade de massa no estado endurecido (DE).	2.071 2.040	2.068 2.073 2.093 1.994	A0 A10 A20 A30 A40 A10 A20 A30 A40	-2 -2 -2 -2 -2 -2 -1 -1 -1	-1 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 0	0 0 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1	+1 +1 +2 +1 +2 +2 +1 +2 +2	A0 A10 A20 A30 A40 A10 A20 A30 A40	Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim	Aceitável Boa Boa Boa
Idade: 28 dias										
Unidade: kg/m ³ .										
Retenção de água (Ra) (U).	89,30 88,30 87,30 86,30	89,27 87,56 87,53 86,42	A0 A10 A20 A30 A40 A10 A20 A30 A40	-2 -2 -2 -2 -2 -2 -1 -1 -1	-1 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 0	0 0 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1	+1 +1 +2 +1 +2 +2 +1 +2 +2	A0 A10 A20 A30 A40 A10 A20 A30 A40	Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim Ruim	Aceitável Boa Boa Boa Boa
Idade: 0 dias										
Unidade: %.										

Ensaios	Comportamento nas composições				Escala				Classificação
	A0	-2	-1	0	+1	+2	A0	Ruim	
Absorção de água por imersão (A).	13,30 12,80	13,57 12,52	A10 A20	-2 -1	0 0	+1 +2	A10 A20	Ruim Ruim	Aceitável Boa
Idade: 28 dias	12,30	12,40	A30 A40	-2 -1	0 0	+1 +2	A30 A40	Ruim Ruim	Aceitável Boa
Unidade: %.	11,80	A0 A10 A20 A30 A40	A40	-2 -1	0 0	+1 +2	A40	Ruim	Aceitável Boa
Índices de vazios (IV).	25,40 24,40	25,31 23,73	A0 A10 A20 A30 A40	-2 -1	0 0	+1 +2	A0 A10	Ruim Ruim	Aceitável Boa
Idade: 28 dias	23,40	23,37	A20 A30	-2 -1	0 0	+1 +2	A20 A30	Ruim Ruim	Aceitável Boa
Unidade: %.	22,40	A0 A10 A20 A30 A40	A40	-2 -1	0 0	+1 +2	A30	Ruim	Aceitável Boa
Massa específica (ρ_s) amostra seca.	1,90	1,91 1,90 1,88	A0 A10 A20 A30 A40	-2 -1	0 0	+1 +2	A0 A10	Ruim Ruim	Aceitável Boa
Idade: 28 dias	1,88	1,86	A30 A40	-2 -1	0 0	+1 +2	A20 A30	Ruim Ruim	Aceitável Boa
Unidade: .	1,86	A0 A10 A20 A30 A40	A40	-2 -1	0 0	+1 +2	A40	Ruim	Aceitável Boa
Massa específica (ρ_{sat}) amostra saturada.	2,14	2,13 2,13 2,12	A0 A10 A20 A30 A40	-2 -1	0 0	+1 +2	A10 A20	Ruim Ruim	Aceitável Boa
Idade: 28 dias	2,13	2,12	A30 A40	-2 -1	0 0	+1 +2	A30 A40	Ruim Ruim	Aceitável Boa
Unidade: .	2,12	A0 A10 A20 A30 A40	A40	-2 -1	0 0	+1 +2	A40	Ruim	Aceitável Boa

Ensaios	Comportamento nas composições				Escala				Classificação	
	A0	-2	-1	0	+1	+2	A0	Ruim	Aceitável	Boa
Massa específica (ρ_r) amostra real.	2,49	2,50	2,49				A10	-2	-1	Boa
Idade: 28 dias	2,47						A10	-2	0	Boa
Unidade: .	2,45						A20	-2	0	Boa
Variação dimensional (retração livre) (ε_l).	0,450	0,411	0,379	0,355	0,335	0,301	A0	-2	-1	Boa
Idade: 28 dias	0,400						A10	-2	0	Boa
Unidade: mm/m.	0,350						A20	-2	-1	Boa
Variação de massa (Δm).	0,300	A0	A10	A20	A30	A40	A30	-2	-1	Boa
Idade: 28 dias	6,00						A40	-2	0	Boa
Unidade: %.	5,00						A0	-2	-1	Boa
	4,00						A10	-2	0	Boa
	3,00	A0	A10	A20	A30	A40	A20	-2	-1	Boa
							A30	-2	0	Boa
							A40	-2	-1	Boa

A-A-3 Quadro referente ao efeito do teor resíduo no comportamento mecânico das argamassas de assentamento.

Ensaios	Comportamento nas composições				Escala				Classificação		
	A0	-2	-1	0	+1	+2	A0	Ruim	Aceitável	Boa	
Resistência à compressão (Rc) ou (f_a).	16,00 14,14	17,17 12,49	A10 A20	-2 -1	0 0	+1 +2	A10 A20	Ruim Ruim	Aceitável Aceitável	Boa Boa	
Idade: 28 dias											
Unidade: Mpa.	12,00 A0	12,07 A10	12,71 A20	12,49 A30	12,46 A40		A30 A40	Ruim Ruim	Aceitável Aceitável	Boa Boa	
Resistência à tração na flexão (Rf).	2,90 2,70 2,50	2,85 2,77 2,66	A0 A10 A20	-2 -2 -1	0 0 0	+1 +2 +1	A0 A10 A20	Ruim Ruim Ruim	Aceitável Aceitável Aceitável	Boa Boa Boa	
Idade: 28 dias											
Unidade: Mpa.	2,30 2,10	2,11 2,09	2,46 2,41								
Módulo de elasticidade dinâmico (Ed).	17,500 15,500	17,079 12,868	A0 A10 A20	-2 -2 -1	0 0 0	+1 +2 +1	A0 A10 A20	Ruim Ruim Ruim	Aceitável Aceitável Aceitável	Boa Boa Boa	
Idade: 91 dias											
Unidade: Mpa.	13,500 11,500	12,499 11,592	12,418 11,592								
Densidade de massa no estado endurecido (DE).	1.935 1.915	1.945 1.926	A0 A10 A20	-2 -2 -1	0 0 0	+1 +2 +1	A0 A10 A20	Ruim Ruim Ruim	Aceitável Aceitável Aceitável	Boa Boa Boa	
Idade: 91 dias											
Unidade: kg/m ³ .	1.895	1.890 1.895	A0 A10 A20	-2 -2 -1	0 0 0	+1 +2 +1	A40 A40	Ruim Ruim	Aceitável Aceitável	Boa Boa	

APÊNDICE B – Análise e tratamento estatístico dos dados.

Scientific Plot
Travessa 14 de Março, 342 – Sala 201, Umarizal.
CEP 66.055-490. Belém – Pará – Brasil
Fone: (91) 98030-1394 (91) 3038-5922
E-mail: mauriliogp@ufpa.br
CNPJ: 45.693.182/0001-61

26 de fevereiro de 2024
Relatório Nº PROJ01.08/2024

Relatório de análise de dados

Solicitado por: Aldemar Tavares

Sumário

1. Descrição da análise	117
1.1 Software and Code	117
2. Análise da resistência à compressão das amostras prismáticas	117
3. Análise da resistência à compressão das amostras cilíndricas	118
4. Análise da resistência à flexão.....	119
5. Análise do módulo de elasticidade dinâmico	120
6. Análise da absorção de água total.....	121
7. Análise do índice de vazios das amostras.....	122
8. Análise da massa específica das amostras	123
9. Análise da variação dimensional das amostras.....	124
9.1. Análise 1 dia.....	124
9.2. Análise 7 dias	125
9.3. Análise 14 dias	125
9.4. Análise 21 dias	126
9.5. Análise 28 dias	126
10. Análise da variação de massa	127
10.1. Análise 1 dia.....	128
10.2. Análise 7 dias	128
10.3. Análise 14 dias	128
10.4. Análise 21 dias	129
10.5. Análise 28 dias	129

1. Descrição da análise

Os dados foram analisados quanto à sua normalidade utilizando-se o teste de Shapiro-Wilk e a sua homoscedasticidade utilizando-se o teste de Levene. Confirmando-se a normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias, os dados foram comparados utilizando-se análise de variância de uma via (ANOVA ONE-WAY) pois havia mais de duas condições experimentais, complementado pelo teste de Tukey quando necessário para análise múltipla dos dados. Foram consideradas diferenças significativas quando $P.\text{valor} < 0.05$ ($P < 0.05$).

Em todos os quadros G.L são os graus de liberdade. Todas as figuras são representadas como média e as barras de erro representam \pm o desvio padrão.

Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre as argamassas para a mesma variável (ANOVA de uma via; complementado pelo teste de Tukey), por exemplo, se em um gráfico de coluna houver as letras **a** na primeira coluna, **b** na segunda coluna e **a** na terceira coluna, significa que a variável da primeira e da terceira coluna se comportam de forma similares, que por sua vez se comportam diferentes da variável da segunda coluna.

Desta forma, qualquer pessoa com conhecimento técnico na área conseguirá reproduzir toda a análise de dados, além de dar mais confiabilidade ao seu trabalho.

1.1 Software and Code

Os dados foram analisados usando o **R** e **Microsoft Excel**. As ilustrações foram criadas usando **R**, **Microsoft Excel**, **Powerpoint** e **Coreldraw**.

2. Análise da resistência à compressão das amostras prismáticas

Para esta análise, a variável controle são, **referência, 10%, 20%, 30% e 40%** e a variável resposta é a resistência à compressão, considerando a unidade experimental as amostras geométricas prismáticas das argamassas endurecidas.

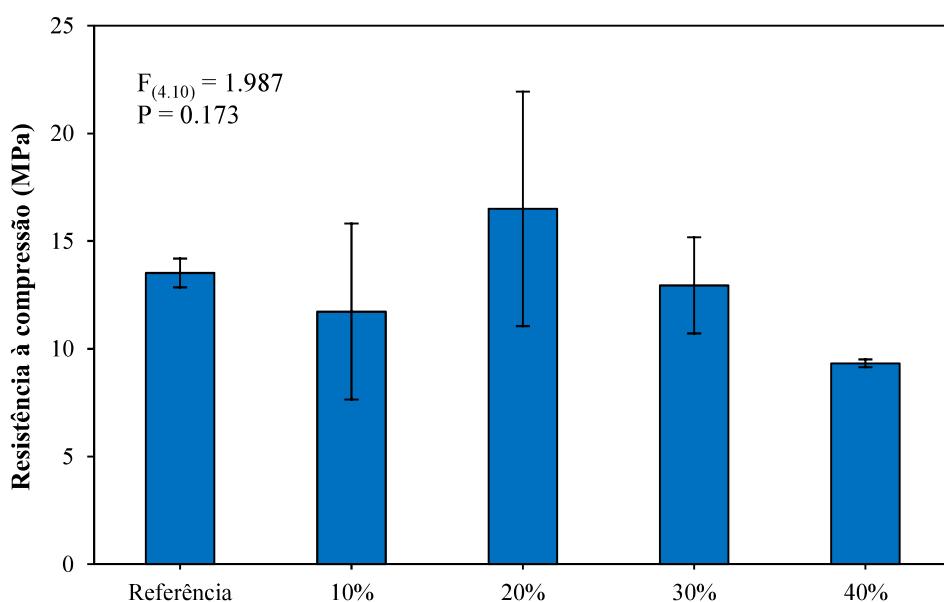
Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	4.000	82.405	20.601	1.987	0.173
Resíduos	10.000	103.700	10.370		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	4.771	-3.882	13.424	0.417
30%-10%	1.219	-7.435	9.872	0.989
40%-10%	-2.406	-11.060	6.247	0.885
Ref-10%	1.792	-6.862	10.445	0.956
30%-20%	-3.552	-12.205	5.101	0.669
40%-20%	-7.177	-15.830	1.476	0.118
Ref-20%	-2.979	-11.632	5.674	0.786
40%-30%	-3.625	-12.278	5.028	0.653
Ref-30%	0.573	-8.080	9.226	0.999
Ref-40%	4.198	-4.455	12.851	0.531

Figura 1. Resposta à resistência à compressão das amostras prismáticas de argamassas. Valores expressos em médias \pm desvio padrão, (ANOVA de uma via; complementado pelo teste de Tukey).



Fonte: O Autor

3. Análise da resistência à compressão das amostras cilíndricas

Para esta análise, a variável controle são, referência, 10%, 20%, 30% e 40% e a variável resposta é a resistência à compressão, considerando a unidade experimental as amostras geométricas cilíndricas das argamassas endurecidas.

Tabela de análise de variância

	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	4.000	42.577	10.644	18.805	0.00012044
Resíduos	10.000	5.660	0.566		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	1.623	-0.398	3.645	0.135
30%-10%	1.183	-0.838	3.205	0.364
40%-10%	3.717	1.695	5.738	0.001
Ref-10%	-1.323	-3.345	0.698	0.271
30%-20%	-0.440	-2.462	1.582	0.948
40%-20%	2.093	0.072	4.115	0.042
Ref-20%	-2.947	-4.968	-0.925	0.005
40%-30%	2.533	0.512	4.555	0.014
Ref-30%	-2.507	-4.528	-0.485	0.015
Ref-40%	-5.040	-7.062	-3.018	0.000

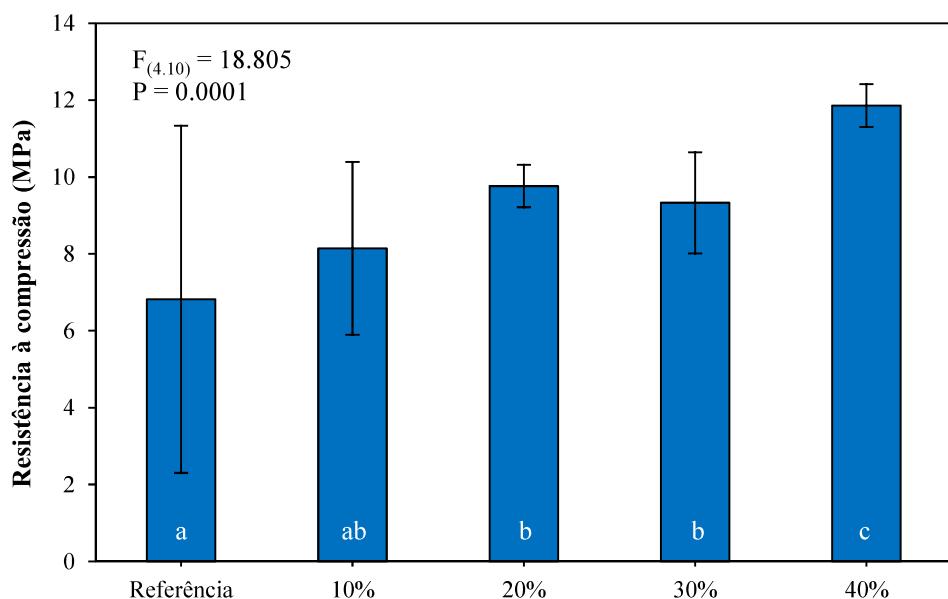


Figura 2. Resposta à resistência à compressão das amostras cilíndricas de argamassas. Valores expressos em médias \pm desvio padrão. Letras minúsculas distintas dentro das colunas, indicam diferença estatística quando as argamassas são comparadas entre si para a mesma variável, (ANOVA de uma via; complementado pelo teste de Tukey).

4. Análise da resistência à flexão

Para esta análise, a variável controle são, **referência, 10%, 20%, 30% e 40%** e a variável resposta é a resistência à flexão, considerando a unidade experimental as amostras geométricas cilíndricas das argamassas endurecidas.

Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat.F	P.valor
Fator	4.000	1.057	0.264	1.034	0.436
Resíduos	10.000	2.554	0.255		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	0.742	-0.616	2.100	0.425
30%-10%	0.664	-0.694	2.022	0.524
40%-10%	0.352	-1.007	1.710	0.908
Ref-10%	0.547	-0.811	1.905	0.683
30%-20%	-0.078	-1.436	1.280	1.000
40%-20%	-0.391	-1.749	0.967	0.872
Ref-20%	-0.195	-1.553	1.163	0.988
40%-30%	-0.313	-1.671	1.046	0.937
Ref-30%	-0.117	-1.475	1.241	0.998
Ref-40%	0.195	-1.163	1.553	0.988

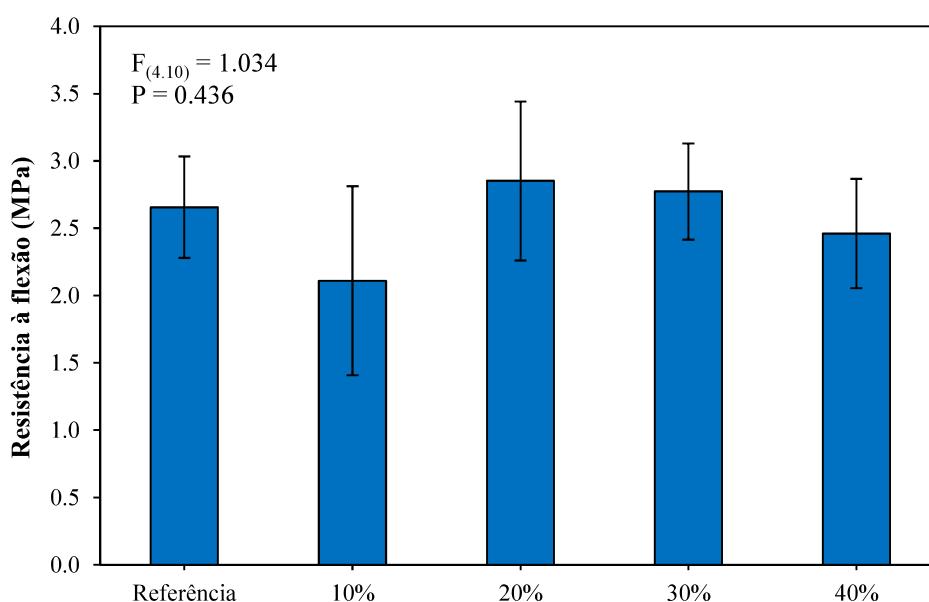


Figura 3. Resposta à resistência à flexão das amostras prismáticas de argamassas. Valores expressos em médias \pm desvio padrão, (ANOVA de uma via; complementado pelo teste de Tukey).

5. Análise do módulo de elasticidade dinâmico

Para esta análise, a variável controle são, **referência, 10%, 20%, 30% e 40%** e a variável resposta é o módulo de elasticidade dinâmico, considerando a unidade experimental as amostras geométricas cilíndricas das argamassas endurecidas.

Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	4.000	54.288	13.572	2.252	0.136
Resíduos	10.000	60.268	6.027		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	3.579	-3.017	10.176	0.431
30%-10%	-1.907	-8.504	4.690	0.870
40%-10%	-1.082	-7.678	5.515	0.981
Ref-10%	-0.691	-7.288	5.906	0.996
30%-20%	-5.487	-12.084	1.110	0.117
40%-20%	-4.661	-11.258	1.936	0.214
Ref-20%	-4.271	-10.868	2.326	0.279
40%-30%	0.826	-5.771	7.422	0.993
Ref-30%	1.216	-5.381	7.813	0.971
Ref-40%	0.390	-6.207	6.987	1.000

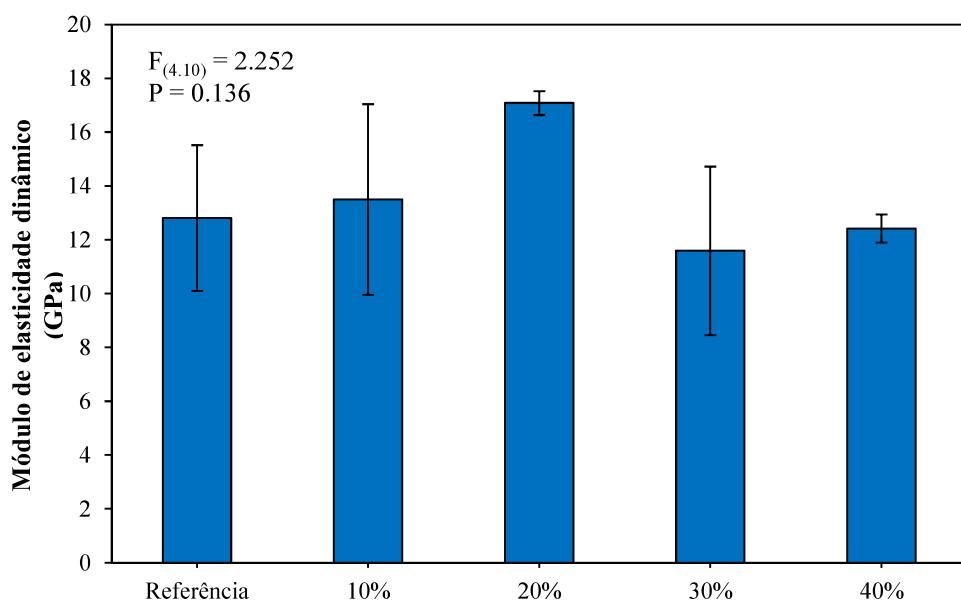


Figura 4. Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas. Valores expressos em médias ± desvio padrão, (ANOVA de uma via; complementado pelo teste de Tukey).

6. Análise da absorção de água total

Para esta análise, a variável controle são, **referência, 10%, 20%, 30% e 40%** e a variável resposta é a absorção de água total das amostras, considerando a unidade experimental as amostras geométricas cilíndricas das argamassas endurecidas.

Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat.F	P.valor
Fator	4.000	6.100	1.525	72.805	2.35E-07
Resíduos	10.000	0.209	0.021		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	-0.577	-0.966	-0.188	0.005
30%-10%	0.112	-0.277	0.501	0.871
40%-10%	-0.573	-0.962	-0.184	0.005
Ref-10%	1.168	0.779	1.557	1.37E-05
30%-20%	0.689	0.300	1.078	0.001
40%-20%	0.004	-0.385	0.393	1.000
Ref-20%	1.744	1.356	2.133	3.23E-07
40%-30%	-0.685	-1.074	-0.296	0.001
Ref-30%	1.056	0.667	1.445	3.39E-05
Ref-40%	1.740	1.352	2.129	3.30E-07

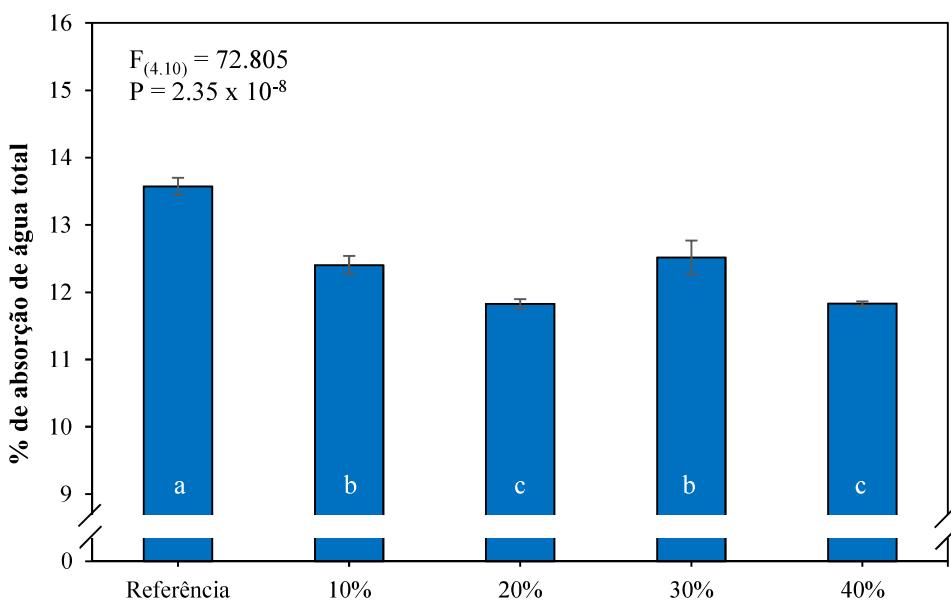


Figura 5. Absorção de água total das amostras. Valores expressos em médias \pm desvio padrão.

Letras minúsculas distintas dentro das colunas, indicam diferença estatística quando as argamassas são comparadas entre si para a mesma variável, (ANOVA de uma via; complementado pelo teste de Tukey).

7. Análise do índice de vazios das amostras

Para esta análise, a variável controle são, referência, 10%, 20%, 30% e 40% e a variável resposta é índice de vazios total das amostras, considerando a unidade experimental as amostras geométricas cilíndricas das argamassas endurecidas.

Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	4.000	15.681	3.920	64.080	4.34E-07
Resíduos	10.000	0.612	0.061		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	-0.892	-1.557	-0.228	0.009
30%-10%	0.369	-0.296	1.034	0.411
40%-10%	-0.785	-1.449	-0.120	0.020
Ref-10%	1.939	1.274	2.603	1.78E-05
30%-20%	1.261	0.597	1.926	0.001
40%-20%	0.108	-0.557	0.772	0.982
Ref-20%	2.831	2.166	3.496	5.24E-07
40%-30%	-1.154	-1.818	-0.489	0.001
Ref-30%	1.570	0.905	2.234	1.15E-04
Ref-40%	2.723	2.059	3.388	7.54E-07

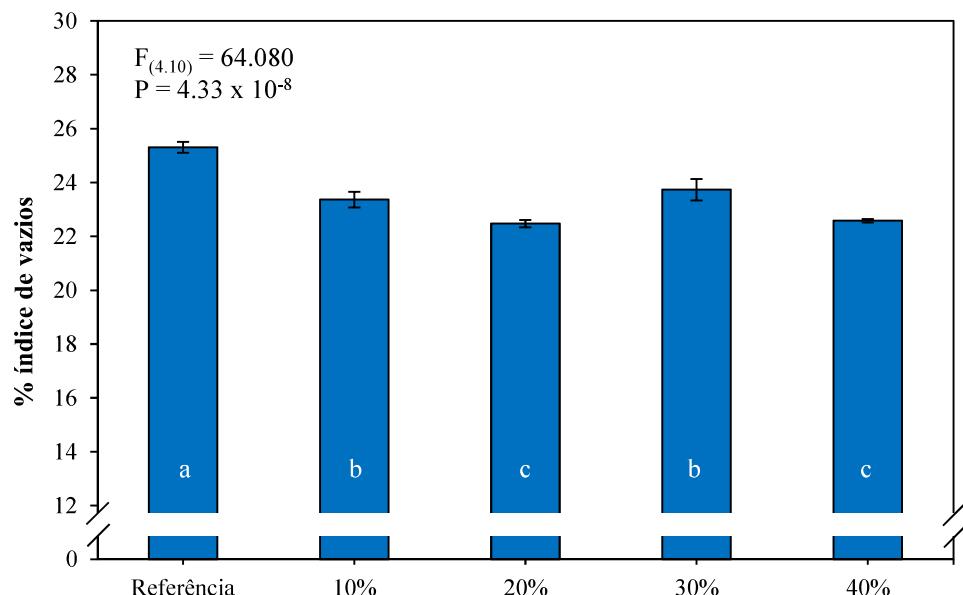


Figura 6. Índice de vazios das amostras. Valores expressos em médias \pm desvio padrão. Letras minúsculas distintas dentro das colunas, indicam diferença estatística quando as argamassas são comparadas entre si para a mesma variável, (ANOVA de uma via; complementado pelo teste de Tukey).

8. Análise da massa específica das amostras

Para esta análise, a variável controle são, referência, 10%, 20%, 30% e 40% e a variável resposta é a massa específica das amostras, considerando a unidade experimental as amostras geométricas cilíndricas das argamassas endurecidas.

Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	4.000	0.004	0.001	13.537	4.81E-04
Resíduos	10.000	0.001	0.000		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	-0.007	-0.031	0.017	0.862
30%-10%	0.029	0.004	0.053	0.021
40%-10%	0.007	-0.017	0.031	0.862
Ref-10%	0.038	0.014	0.062	0.003
30%-20%	0.036	0.011	0.060	0.005
40%-20%	0.014	-0.010	0.039	0.357
Ref-20%	0.045	0.021	0.070	0.001
40%-30%	-0.021	-0.046	0.003	0.093
Ref-30%	0.010	-0.015	0.034	0.705
Ref-40%	0.031	0.007	0.055	0.013

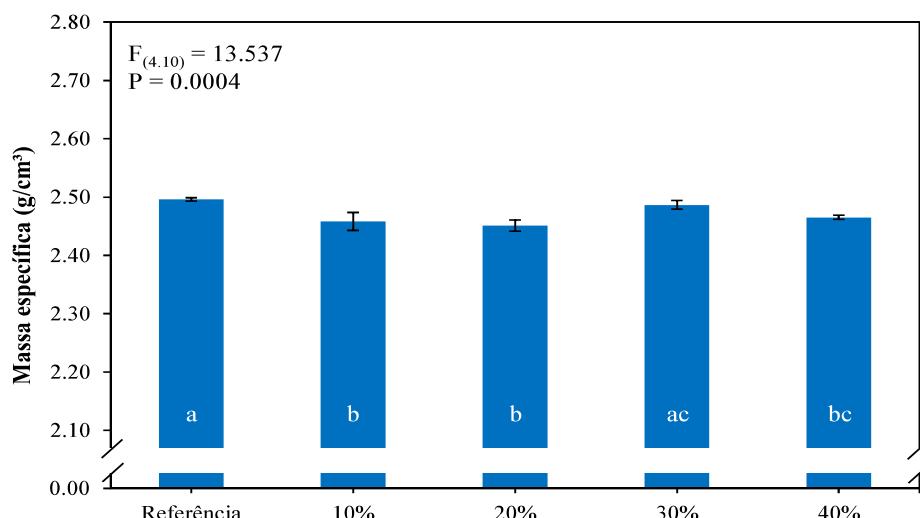


Figura 7. Massa específica das argamassas. Valores expressos em médias \pm desvio padrão. Letras minúsculas distintas dentro das colunas, indicam diferença estatística quando as argamassas são comparadas entre si para a mesma variável, (ANOVA de uma via; complementado pelo teste de Tukey).

9. Análise da variação dimensional das amostras

Para esta análise, a variável controle são, **referência, 10%, 20%, 30% e 40%** e o tempo, **1 dia, 7 dias, 14 dias, 21 dias e 28 dias**, a variável resposta é a variação dimensional das amostras, considerando a unidade experimental as amostras geométricas cilíndricas das argamassas endurecidas.

9.1. Análise 1 dia

Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	4.000	0.007	0.002	1.627	0.242
Resíduos	10.000	0.011	0.001		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	0.029	-0.060	0.119	0.812
30%-10%	0.027	-0.063	0.116	0.857
40%-10%	-0.023	-0.112	0.067	0.913
Ref-10%	-0.019	-0.108	0.071	0.954
30%-20%	-0.003	-0.092	0.087	1.000
40%-20%	-0.052	-0.141	0.037	0.367
Ref-20%	-0.048	-0.137	0.041	0.438
40%-30%	-0.049	-0.139	0.040	0.414
Ref-30%	-0.045	-0.135	0.044	0.490
Ref-40%	0.004	-0.085	0.093	1.000

9.2. Análise 7 dias

Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat.F	P.valor
Fator	4.000	0.006	0.002	1.363	0.314
Resíduos	10.000	0.012	0.001		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	0.053	-0.038	0.145	0.369
30%-10%	0.035	-0.057	0.126	0.727
40%-10%	0.000	-0.092	0.092	1.000
Ref-10%	0.024	-0.068	0.116	0.904
30%-20%	-0.019	-0.110	0.073	0.958
40%-20%	-0.053	-0.145	0.038	0.369
Ref-20%	-0.029	-0.121	0.062	0.825
40%-30%	-0.035	-0.126	0.057	0.727
Ref-30%	-0.011	-0.102	0.081	0.995
Ref-40%	0.024	-0.068	0.116	0.904

9.3. Análise 14 dias

Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat.F	P.valor
Fator	4.000	0.014	0.003	2.596	0.101
Resíduos	10.000	0.013	0.001		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	-0.043	-0.140	0.055	0.618
30%-10%	-0.027	-0.124	0.071	0.890
40%-10%	-0.080	-0.177	0.017	0.123
Ref-10%	0.001	-0.096	0.099	1.000
30%-20%	0.016	-0.081	0.113	0.981
40%-20%	-0.037	-0.135	0.060	0.719
Ref-20%	0.044	-0.053	0.141	0.593
40%-30%	-0.053	-0.151	0.044	0.423
Ref-30%	0.028	-0.069	0.125	0.873
Ref-40%	0.081	-0.016	0.179	0.115

9.4. Análise 21 dias

Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	4.000	0.005	0.001	1.183	0.376
Resíduos	10.000	0.012	0.001		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	-0.041	-0.133	0.050	0.591
30%-10%	-0.045	-0.137	0.046	0.511
40%-10%	-0.043	-0.134	0.049	0.564
Ref-10%	-0.009	-0.101	0.082	0.997
30%-20%	-0.004	-0.095	0.087	1.000
40%-20%	-0.001	-0.093	0.090	1.000
Ref-20%	0.032	-0.059	0.123	0.777
40%-30%	0.003	-0.089	0.094	1.000
Ref-30%	0.036	-0.055	0.127	0.699
Ref-40%	0.033	-0.058	0.125	0.752

9.5. Análise 28 dias

Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	4.000	0.012	0.003	2.046	0.164
Resíduos	10.000	0.014	0.001		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	-0.053	-0.156	0.049	0.466
30%-10%	-0.033	-0.136	0.069	0.816
40%-10%	-0.077	-0.180	0.025	0.169
Ref-10%	-0.011	-0.113	0.092	0.996
30%-20%	0.020	-0.082	0.122	0.964
40%-20%	-0.024	-0.126	0.078	0.933
Ref-20%	0.043	-0.060	0.145	0.656
40%-30%	-0.044	-0.146	0.058	0.632
Ref-30%	0.023	-0.080	0.125	0.945
Ref-40%	0.067	-0.036	0.169	0.274

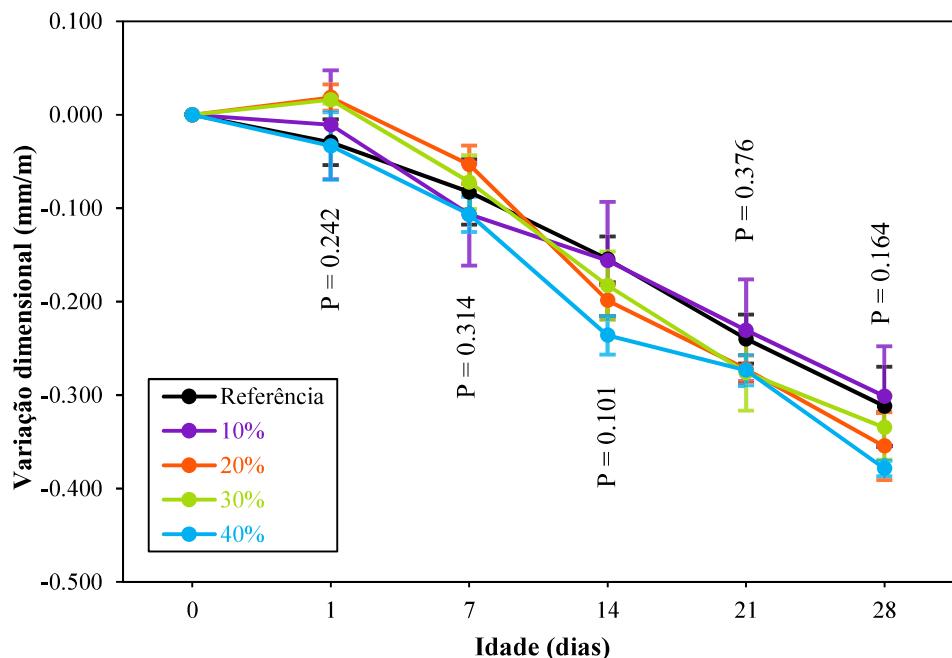


Figura 8. Variação dimensional das amostras de argamassas. Valores expressos em médias ± desvio padrão, (ANOVA de uma via; complementado pelo teste de Tukey).

10. Análise da variação de massa

Para esta análise, a variável controle são, **referência, 10%, 20%, 30% e 40%** e o tempo, **1 dia, 7 dias, 14 dias, 21 dias e 28 dias**, a variável resposta é a variação de massa das amostras, considerando a unidade experimental as amostras geométricas cilíndricas das argamassas endurecidas.

10.1. Análise 1 dia

Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	4.000	1.515	0.379	119.681	2.12E-08
Resíduos	10.000	0.032	0.003		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	0.244	0.093	0.395	0.002
30%-10%	0.256	0.105	0.407	0.002
40%-10%	-0.575	-0.727	-0.424	1.51E-06
Ref-10%	0.231	0.080	0.382	0.004
30%-20%	0.012	-0.139	0.163	0.999
40%-20%	-0.820	-0.971	-0.668	5.59E-08
Ref-20%	-0.013	-0.164	0.138	0.998
40%-30%	-0.832	-0.983	-0.681	4.84E-08
Ref-30%	-0.025	-0.176	0.126	0.980
Ref-40%	0.807	0.656	0.958	6.50E-08

10.2. Análise 7 dias

Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	4.000	4.058	1.014	106.324	3.77E-08
Resíduos	10.000	0.095	0.010		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	0.218	-0.045	0.480	0.118
30%-10%	-0.260	-0.523	0.002	0.052
40%-10%	-1.201	-1.463	-0.938	2.70E-07
Ref-10%	0.166	-0.096	0.429	0.297
30%-20%	-0.478	-0.740	-0.215	0.001
40%-20%	-1.418	-1.681	-1.156	5.77E-08
Ref-20%	-0.051	-0.314	0.211	0.964
40%-30%	-0.941	-1.203	-0.678	2.67E-06
Ref-30%	0.426	0.164	0.689	0.002
Ref-40%	1.367	1.105	1.629	8.18E-08

10.3. Análise 14 dias

Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	4.000	2.686	0.671	83.152	1.24E-07
Resíduos	10.000	0.081	0.008		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	0.106	-0.136	0.347	0.617
30%-10%	-0.064	-0.305	0.178	0.902
40%-10%	-0.909	-1.151	-0.668	1.68E-06
Ref-10%	0.333	0.091	0.574	0.007
30%-20%	-0.170	-0.411	0.072	0.218
40%-20%	-1.015	-1.256	-0.773	5.94E-07
Ref-20%	0.227	-0.015	0.468	0.068
40%-30%	-0.845	-1.087	-0.604	3.33E-06
Ref-30%	0.396	0.155	0.638	0.002
Ref-40%	1.242	1.000	1.483	9.21E-08

10.4. Análise 21 dias

Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	4.000	4.207	1.052	118.015	2.26E-08
Resíduos	10.000	0.089	0.009		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	0.252	-0.002	0.506	0.052
30%-10%	-0.100	-0.354	0.154	0.699
40%-10%	-1.182	-1.435	-0.928	2.29E-07
Ref-10%	0.240	-0.014	0.494	0.066
30%-20%	-0.352	-0.606	-0.098	0.007
40%-20%	-1.433	-1.687	-1.180	3.71E-08
Ref-20%	-0.012	-0.266	0.242	1.000
40%-30%	-1.082	-1.335	-0.828	5.19E-07
Ref-30%	0.340	0.086	0.593	0.009
Ref-40%	1.421	1.168	1.675	4.04E-08

10.5. Análise 28 dias

Tabela de análise de variância

Tabela da Anova	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P.valor
Fator	4.000	5.176	1.294	154.870	5.99E-09
Resíduos	10.000	0.084	0.008		

Tabela de comparações múltiplas

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
20%-10%	0.221	-0.025	0.467	0.083
30%-10%	-0.098	-0.344	0.148	0.689
40%-10%	-1.247	-1.492	-1.001	1.04E-07
Ref-10%	0.451	0.205	0.697	0.001
30%-20%	-0.319	-0.565	-0.074	0.011
40%-20%	-1.468	-1.713	-1.222	2.07E-08
Ref-20%	0.230	-0.016	0.475	0.069
40%-30%	-1.148	-1.394	-0.903	2.21E-07
Ref-30%	0.549	0.303	0.795	1.83E-04
Ref-40%	1.698	1.452	1.943	3.62E-09

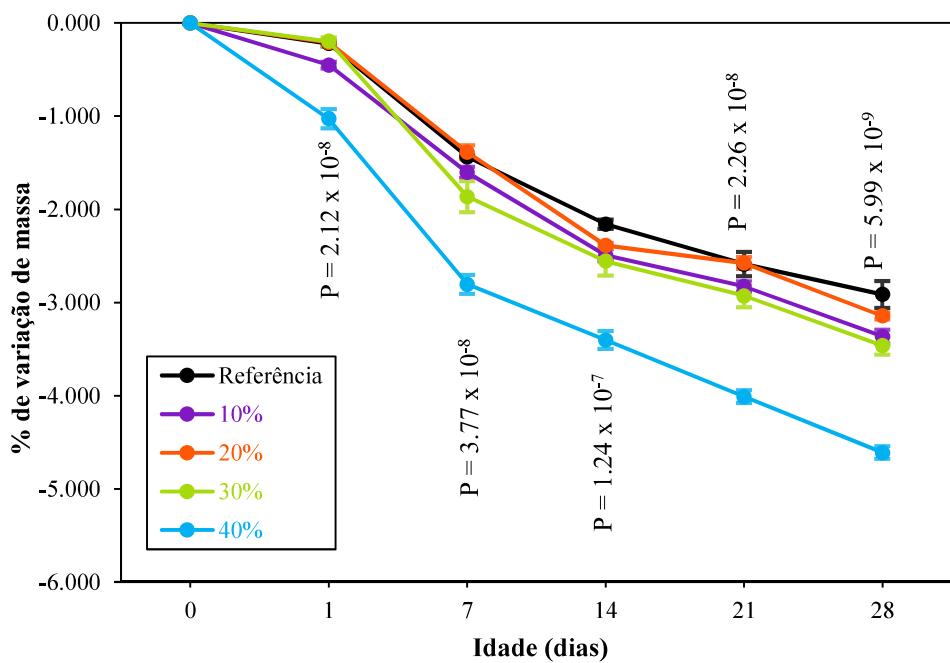


Figura 9. Variação de massa das amostras de argamassas. Valores expressos em médias \pm desvio padrão, (ANOVA de uma via; complementado pelo teste de Tukey).

Ref da amostra	: CPII F32
Type produit	: Cimento
Client	: UFCG
Comentários	: Calibrado
Líquido	: Água
Agente dispersante	: Nenhum
Operador	: Juliana
Empresa	: UFCG
Localização	: Campina Grande - PB
Data : 15/12/2023	Hora : 15:25:06
Índice med.	4270

Ultrasom	: 60	s
Concentração	: 164	
Diâmetro a 10%	: 0.93	mu
Diâmetro a 50%	: 8.13	mu
Diâmetro a 90%	: 24.65	mu
Diâmetro médio	: 10.65	mu
Fraunhofer	-----	
Densidade/Fator	-----	
Superfície específica	-----	
Diluição automática	: Não / Não	
Medida./Limp.	: 60/60/3	
SOP : Argila		

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

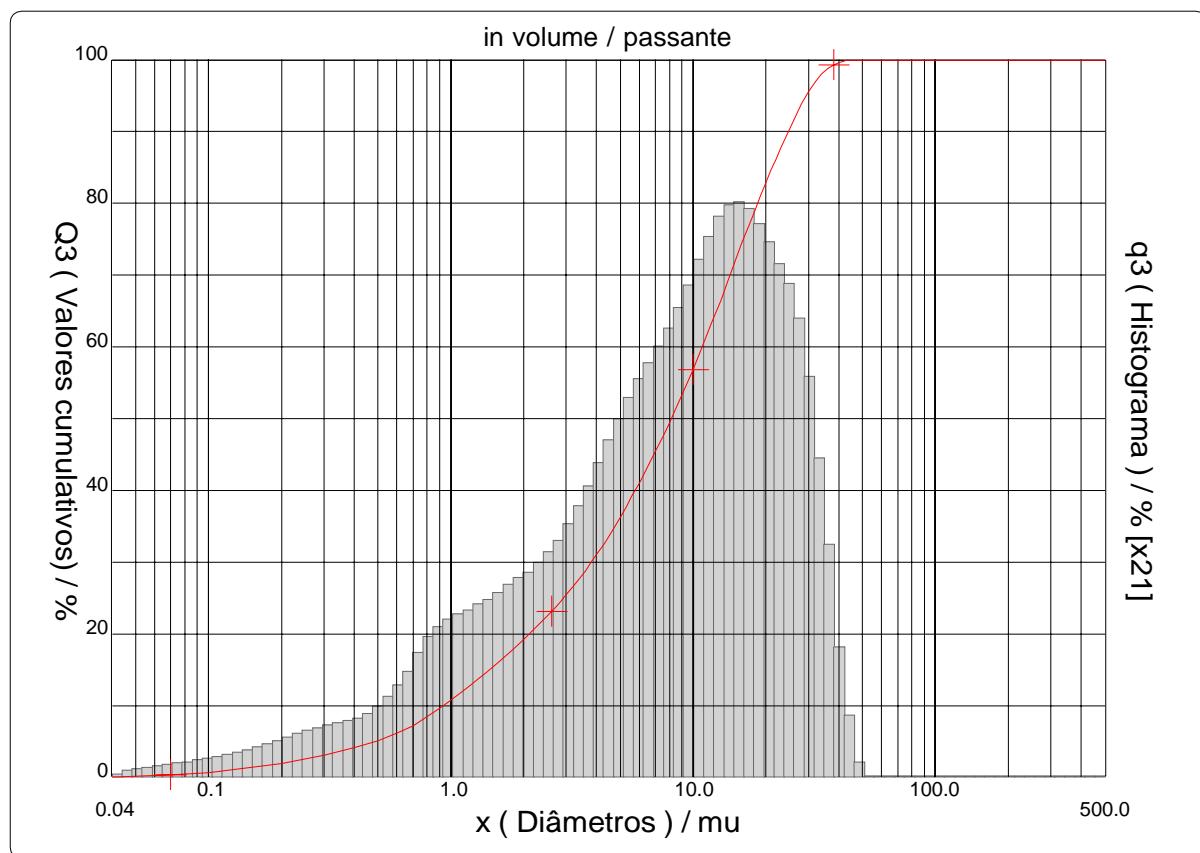
x	0.04	0.07	0.10	0.25	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00
Q3	0.02	0.32	0.68	2.55	5.15	7.87	10.77	19.23	25.45	31.03

x	5.00	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00	65.00	85.00	100.0	150.0
Q3	36.26	56.87	82.90	95.59	99.64	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	25.00	40.00	75.00	85.00	100.0
Q3	2.92	5.77	16.16	21.23	45.00



Ref da amostra	:	CPII F32
Type produit	:	Cimento
Client	:	UFCG
Comentários	:	Calibrado
Líquido	:	Água
Agente dispersante	:	Nenhum
Operador	:	Juliana
Empresa	:	UFCG
Localização	:	Campina Grande - PB
Data : 15/12/2023	Hora : 15:25:06	
Índice med.		4270

Ultrasom	:	60	s
Concentração	:	164	
Diâmetro a 10%	:	0.93	mu
Diâmetro a 50%	:	8.13	mu
Diâmetro a 90%	:	24.65	mu
Diâmetro médio	:	10.65	mu
Fraunhofer	:	-----	
Densidade/Fator	:	-----	
Superfície específica	:	-----	
Diluição automática	:	Não / Não	
Medida./Limp.	:	60/60/3	
SOP :	Argila		

Valores cumulados característicos
in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.02	0.32	0.68	1.92	3.14	4.19	5.15	6.17	7.27	8.47
q3	0.01	0.04	0.08	0.14	0.23	0.28	0.33	0.42	0.54	0.68
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	9.65	10.77	11.82	12.80	13.73	14.61	16.26	17.80	19.23	20.57
q3	0.76	0.80	0.83	0.85	0.88	0.90	0.93	0.99	1.03	1.06
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	21.86	23.09	24.28	25.45	26.60	27.73	28.84	29.94	31.03	32.64
q3	1.12	1.16	1.21	1.28	1.35	1.41	1.47	1.54	1.61	1.68
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	34.22	36.26	37.75	39.21	41.08	43.32	45.46	47.52	49.50	51.42
q3	1.77	1.85	1.93	2.01	2.05	2.12	2.18	2.26	2.32	2.40
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	53.28	56.87	60.28	63.52	66.58	69.45	72.13	74.62	76.93	79.07
q3	2.46	2.58	2.71	2.82	2.89	2.93	2.94	2.92	2.88	2.83
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	81.05	82.90	84.62	86.22	87.72	90.46	93.83	95.59	96.97	98.04
q3	2.77	2.73	2.67	2.60	2.55	2.49	2.25	1.93	1.62	1.33
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	98.82	99.32	99.64	99.91	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	1.03	0.70	0.47	0.28	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Ref da amostra	: CAULIM CALCINADO 600
Type produit	: dispersão
Client	: UFCG
Comentários	: Calibrado
Líquido	: Água
Agente dispersante	: HMFNa + Na2CO3
Operador	: Juliana
Empresa	: UFCG
Localização	: Campina Grande - PB
Data : 15/12/2023	Hora : 15:33:30
Índice med.	4271

Ultrasom	: 60	s
Concentração	: 120	
Diâmetro a 10%	: 1.23	mu
Diâmetro a 50%	: 5.45	mu
Diâmetro a 90%	: 13.64	mu
Diâmetro médio	: 6.58	mu
Fraunhofer	-----	
Densidade/Fator	-----	
Superfície específica	-----	
Diluição automática	: Não / Não	
Medida./Limp.	: 60/60/3	
SOP : Argila		

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

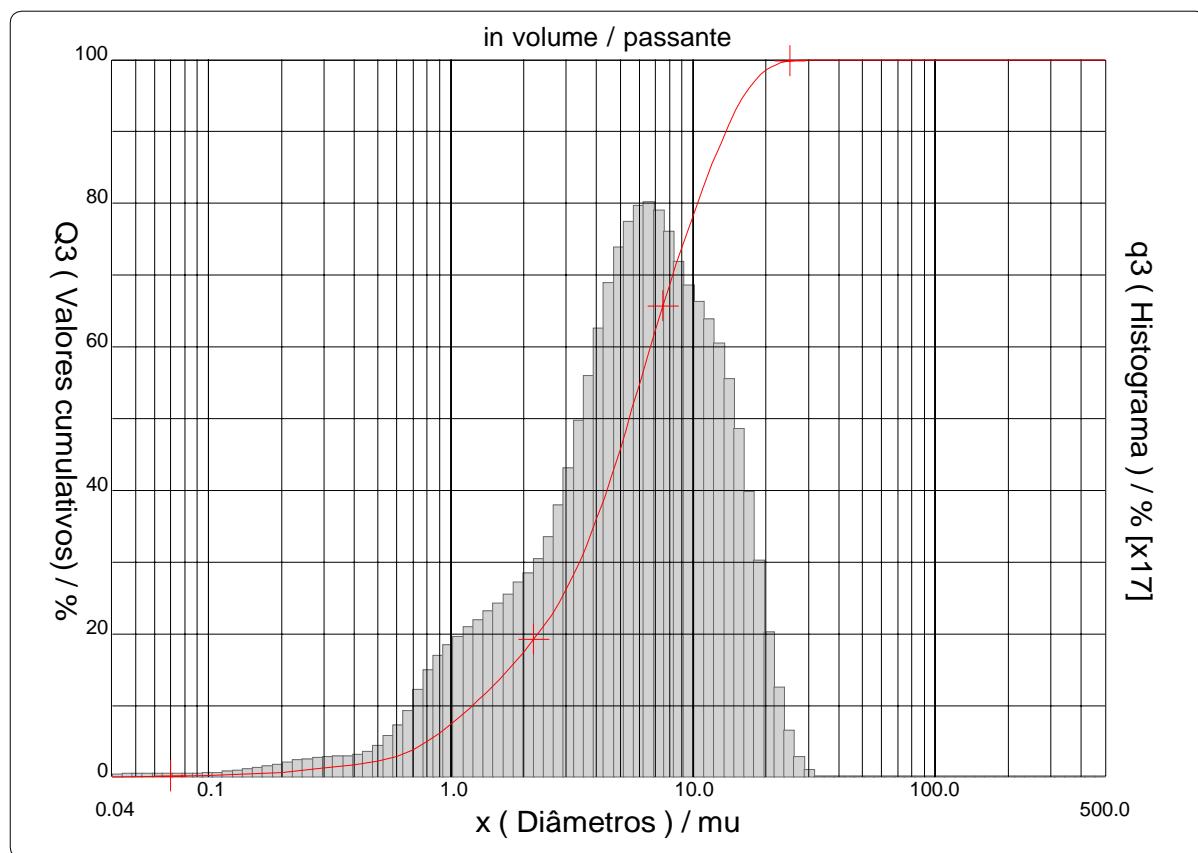
x	0.04	0.07	0.10	0.25	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00
Q3	0.05	0.18	0.26	0.99	2.27	4.39	7.38	17.48	26.21	35.97

x	5.00	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00	65.00	85.00	100.0	150.0
Q3	45.83	78.26	98.57	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	25.00	40.00	75.00	85.00	100.0
Q3	2.86	4.40	9.25	11.85	30.00



Ref da amostra : CAULIM CALCINADO 600
 Type produit : dispersão
 Client : UFCG
 Comentários : Calibrado
 Líquido : Água
 Agente dispersante : HMFNa + Na2CO3
 Operador : Juliana
 Empresa : UFCG
 Localização : Campina Grande - PB
 Data : 15/12/2023 Hora : 15:33:30
 Índice med. 4271

Ultrasom : 60 s
 Concentração : 120
 Diâmetro a 10% : 1.23 mu
 Diâmetro a 50% : 5.45 mu
 Diâmetro a 90% : 13.64 mu
 Diâmetro médio : 6.58 mu
 Fraunhofer -----
 Densidade/Fator -----
 Superfície específica -----
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/3
 SOP : Argila

Valores cumulados característicos
in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.05	0.18	0.26	0.69	1.28	1.78	2.27	2.95	3.84	4.97
q3	0.01	0.02	0.02	0.05	0.11	0.13	0.17	0.28	0.43	0.64
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	6.18	7.38	8.54	9.67	10.75	11.80	13.79	15.67	17.48	19.20
q3	0.77	0.86	0.92	0.98	1.01	1.07	1.12	1.20	1.29	1.36
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	20.91	22.63	24.40	26.21	28.10	30.03	31.99	33.97	35.97	38.98
q3	1.48	1.62	1.80	1.97	2.20	2.39	2.58	2.75	2.93	3.13
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	41.96	45.83	48.63	51.33	54.75	58.73	62.38	65.69	68.69	71.39
q3	3.32	3.49	3.61	3.69	3.73	3.74	3.70	3.61	3.49	3.35
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	73.86	78.26	82.11	85.47	88.39	90.88	92.97	94.68	96.06	97.15
q3	3.25	3.14	3.04	2.90	2.74	2.53	2.28	1.99	1.71	1.43
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	97.96	98.57	99.02	99.35	99.59	99.84	99.98	100.00	100.00	100.00
q3	1.13	0.89	0.69	0.53	0.41	0.23	0.09	0.02	0.00	0.00
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %