



UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS – PPGCEM

LAURA PEREIRA DA ROSA

COMPORTAMENTO REOLÓGICO, FÍSICO E MECÂNICO DE ARGAMASSAS
DESENVOLVIDAS COM O RESÍDUO DA NEFELINA SIENITO

Criciúma

2024

LAURA PEREIRA DA ROSA

**COMPORTAMENTO REOLÓGICO, FÍSICO E MECÂNICO DE ARGAMASSAS
DESENVOLVIDAS COM O RESÍDUO DA NEFELINA SIENITO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira.

Criciúma

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

R788c Rosa, Laura Pereira da.

Comportamento reológico, físico e mecânico de argamassas desenvolvidas com o resíduo da nefelina sienito / Laura Pereira da Rosa. - 2024.
106 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2024.
Orientação: Fabiano Raupp Pereira.

1. Nefelina sienito. 2. Resíduos da mineração.
3. Argamassa - Reologia. 4. Argamassa - Propriedades físicas. 5. Argamassa - Propriedades mecânicas. I. Título.

CDD 23. ed. 620.135

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Laura Pereira da Rosa

Comportamento reológico, físico e mecânico de argamassas desenvolvidas com o resíduo da nefelina sienito

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 08 de fevereiro de 2024.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **SABRINA ARCARO**
Data: 09/02/2024 11:39:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Sabrina Arcaro
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Documento assinado digitalmente
 **OSCAR RUBEM KLEGUES MONTEDO**
Data: 09/02/2024 12:49:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Assinado por: **Manuel Joaquim Peixoto Marques Ribeiro**
Num. de Identificação: 05403140
Data: 2024.02.09 15:36:06+00'00'



Prof. Dr. Manuel Joaquim Peixoto Ribeiro
Instituto Politécnico de Viana do Castelo- IPVC

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me guiar e me conceder forças em todos os momentos da minha vida.

Ao meu pai, José (in memoriam), engenheiro civil e fonte de inspiração em minha caminhada profissional. Mesmo com sua partida precoce manteve o amor pela engenharia presente na família. Saudades!

À minha mãe, Juciane, por todo o carinho, amor e dedicação. Obrigada por sempre estar ao meu lado. Te amo!

Ao meu marido, Diego, pelo companheirismo, carinho e apoio. Obrigada por não medir esforços para me ajudar, me incentivar e me encorajar. E obrigada por toda ajuda na realização dos ensaios e pelas inúmeras contribuições com esta pesquisa. Te amo!

Aos meus filhos de quatro patas, Bruce e Meg, que são capazes de proporcionar tanta alegria aos meus dias.

Ao meu orientador Fabiano, pela orientação e por toda atenção, paciência e confiança durante este percurso.

Aos membros da banca examinadora, professora Sabrina, professor Oscar e professor Manuel, pela disponibilidade de participação e pelas contribuições sugeridas.

Às empresas Grupo Rio Deserto e Cerro Branco, pela disponibilização dos materiais necessários e das informações relacionadas aos mesmos.

À Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) e ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), pelas instalações dos laboratórios e pelos equipamentos necessários para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) da UNESC e a todos os professores que contribuíram durante esta jornada.

Pela prestatividade e pela disponibilidade da infraestrutura para a realização dos ensaios, agradeço aos laboratórios: CerTec/UNESC, em especial, à professora Sabrina por todo auxílio; LabValora/UNESC, em especial ao Fábio e Mariani; e ao Laboratório de Materiais de Construção/IFSC, em especial, ao professor Diego, professor Anderson e aos técnicos Lucas R. e Lucas F., pela colaboração na realização dos ensaios.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (Fapesc) pelo apoio financeiro, permitindo a viabilização desta pesquisa.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha caminhada até aqui, muito obrigada!

RESUMO

A valorização de resíduos de mineração por meio da sua utilização como agregado miúdo para o desenvolvimento de argamassas proporciona diversos benefícios ambientais. Todavia, faz-se necessário o estudo das propriedades reológicas, físicas e mecânicas da matriz cimentícia desenvolvida com resíduos, a fim de verificar a viabilidade técnica de aplicação de um material alternativo como agregado miúdo em substituição ao convencional. Frente a essa situação, o presente estudo tem como objetivo avaliar o comportamento reológico, físico e mecânico de argamassas desenvolvidas com a valorização do resíduo da nefelina sienito (RNS) em substituição ao agregado miúdo natural (AMN). Para isso, realizou-se a caracterização destes materiais e o desenvolvimento das argamassas com o RNS nos teores de 0, 25, 50, 75 e 100 % em substituição ao AMN. Estas argamassas foram submetidas à análise reológica, por meio dos ensaios de índice de consistência e reometria rotacional, e à análise física e mecânica, por meio dos ensaios do teor de ar, da retenção de água, da densidade de massa, da absorção de água por capilaridade, da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão. Os resultados demonstram que o RNS apresenta partículas irregulares, superfície rugosa, maior área de superfície específica e menor massa unitária quando comparado ao AMN. Para as argamassas, à medida em que se aumenta o teor de RNS, a viscosidade aumenta significativamente, sendo que para os teores acima de 50 % de substituição, a trabalhabilidade reduz drasticamente, interferindo no manuseio e na aplicação das argamassas. Foi possível estabelecer fortes correlações entre os parâmetros do ensaio de índice de consistência e de reometria rotacional; no entanto, a reometria foi capaz de contribuir para uma análise mais aprofundada a respeito do comportamento no estado fresco das argamassas desenvolvidas. Adicionalmente, o acréscimo de RNS conduz a um tênue incremento do teor de ar, da retenção de água e da absorção de água; por outro lado, proporciona uma redução acentuada da densidade de massa. Os resultados de resistência mecânica à tração na flexão e à compressão, exibiram valores entre 0,53 a 1,19 MPa para todos os teores. Diante dos resultados, demonstra-se ser possível substituir até 50 % de AMN por RNS sem prejuízo às propriedades da argamassa, colaborando com a redução da demanda por agregado miúdo natural, bem como impulsionando o desenvolvimento sustentável a partir de ações de circularidade mineral por meio da valorização de resíduos.

Palavras-chave: Nefelina sienito, resíduos de mineração, reologia de argamassas, propriedades das argamassas.

ABSTRACT

The valorization of mining residues through their utilization as fine aggregate for mortar development provides various environmental benefits. However, it is necessary to study the rheological, physical, and mechanical properties of the cementitious matrix developed with residues to verify the technical feasibility of applying an alternative material as fine aggregate in substitution for the conventional one. In this context, the present study aims to assess the rheological, physical, and mechanical behavior of mortars developed with the valorization of nepheline syenite residue (NSR) replacing natural fine aggregate (NFA). For this purpose, the characterization of these materials was carried out, and mortars were developed with NSR content ranging from 0, 25, 50, 75, to 100% in substitution for NFA. These mortars underwent rheological analysis through consistency index and rotational rheometry tests, as well as physical and mechanical analysis through air content, water retention, bulk density, capillary water absorption, flexural tensile strength, and compressive strength tests. The results demonstrate that NSR exhibits irregular particles, a rough surface, higher specific surface area, and lower unit mass compared to NFA. For the mortars, as the NSR content increases, viscosity significantly increases. However, for substitution levels above 50%, workability drastically reduces, impacting the handling and application of the mortars. Strong correlations were established between the parameters of the consistency index and rotational rheometry tests; however, rheometry contributed to a more in-depth analysis of the fresh state behavior of the developed mortars. Additionally, the addition of NSR leads to a slight increase in air content, water retention, and water absorption, while providing a pronounced reduction in bulk density. The results of mechanical tensile strength and compressive strength exhibited values between 0.53 to 1.19 MPa for all substitution levels. In light of these results, it is demonstrated that it is possible to substitute up to 50% of NFA with NSR without compromising the mortar properties, contributing to the reduction of demand for natural fine aggregate and promoting sustainable development through mineral circularity actions via residue valorization.

Keywords: Nepheline syenite, mining wastes, mortar rheology, properties of mortars.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação gráfica do número de publicações relacionadas aos termos principais da pesquisa entre os anos de 2013 e 2023.	17
Figura 2 – Classificação dos fluidos de acordo com o comportamento da curva de fluxo.	25
Figura 3 – Representação esquemática dos comportamentos tixotrópico e reopético: (a) em função da taxa de cisalhamento resultando em uma área de histerese; (b) em função do tempo sob uma taxa de cisalhamento constante.	26
Figura 4 – Representação esquemática da microestrutura de uma argamassa fresca.	26
Figura 5 – Representação esquemática do sistema Vane.	30
Figura 6 – Detalhamento das diferentes etapas do plano experimental adotado.	36
Figura 7 – Reômetro e <i>spindle</i> utilizados no ensaio de reometria rotacional: (a) Reômetro <i>HAAKE MARS iQ</i> ; (b) <i>Spindle Vane</i>	43
Figura 8 – Representação do procedimento experimental utilizado no ensaio de reometria. ..	44
Figura 9 – Posicionamento do recipiente e do <i>spindle Vane</i> : (a) recipiente com argamassa posicionado de forma centralizada no reômetro; (b) representação esquemática do posicionamento do <i>spindle Vane</i> no recipiente.	45
Figura 10 – Representação esquemática do posicionamento das amostras na prensa: (a) posicionamento do bloco cerâmico; (b) posicionamento do prisma.	49
Figura 11 – Imagens de MEV revelando a morfologia dos agregados: (a) morfologia do AMN; (b) morfologia do RNS.	52
Figura 12 – Imagens de MEV exibindo o aspecto da superfície dos agregados: (a) superfície do AMN; (b) superfície do RNS.	53
Figura 13 – Curvas da distribuição do tamanho de partículas dos agregados.	56
Figura 14 – Percentual das partículas dos agregados retidas nas peneiras: (a) partículas do AMN; (b) das partículas do RNS.	57
Figura 15 – Curvas térmicas para a determinação do período de indução do cimento.	60
Figura 16 – Índices de consistência das argamassas obtidos pela mesa de fluxo.	62
Figura 17 – Curvas de fluxo das argamassas obtidas pela reometria rotacional.	64
Figura 18 – Curvas de viscosidade aparente das argamassas obtidas pela reometria rotacional.	65
Figura 19 – Coeficientes de determinação (R^2) entre a consistência e os parâmetros gerados pela reometria: (a) torque; (b) viscosidade.	70
Figura 20 – Densidade de massa nos estados fresco e endurecido das argamassas.	74

Figura 21 – Absorção de água por capilaridade das argamassas no tempo de 10 e 90 min.....	76
Figura 22 – Resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas após a cura ao ar por 28 dias.....	77
Figura 23 – Resistência à compressão dos blocos cerâmicos e dos prismas.	79
Figura 24 – Imagens destacando o local da ruptura dos prismas: (a) prismas com a D0; (b) prismas com a D100.	80
Figura 25 – Imagens revelando as características visuais das juntas dos prismas: (a) prisma com a D0; (b) prisma com a D75; (c) prisma com a D100.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas e químicas dos aglomerantes.	35
Tabela 2 – Dosagens das argamassas desenvolvidas, em volume.....	40
Tabela 3 – Composição dos óxidos mais prováveis dos agregados.	51
Tabela 4 – Área de superfície específica dos agregados.	54
Tabela 5 – Propriedades físicas dos agregados.	57
Tabela 6 – Parâmetros gerados pelo índice de consistência e reometria rotacional.....	69
Tabela 7 – Teor de ar das argamassas.	71
Tabela 8 – Retenção de água das argamassas.....	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais propriedades requeridas para a argamassa de assentamento.	22
Quadro 2 – Procedimento de mistura dos insumos para a preparação das argamassas.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/a – água/aglomerantes
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
 Al_2O_3 – Óxido de alumínio (alumina)
AMN – Agregado miúdo natural
BET – Brunauer, Emmett e Teller
CaO – Óxido de cálcio
CerTec – Laboratório de Cerâmica Técnica
 CO_2 – Dióxido de carbono
CP – Cimento Portland
CP II-F – Cimento Portland composto com fíler
DMC – Dimensão máxima característica
 Fe_2O_3 – Óxido de ferro
FRX – Fluorescência de raios X
IDT – Instituto de Engenharia e Tecnologia
iParque – Parque Científico e Tecnológico
 K_2O – Óxido de potássio
MgO – Óxido de magnésio
MEV – Microscopia eletrônica de varredura
MF – Módulo de finura
 Na_2O – Óxido de sódio
NBR – Norma Brasileira
NM – Norma Mercosul
ONU – Organização das Nações Unidas
P.F. – Perda ao fogo
RCD – Resíduos de construção e demolição
RNS – Resíduo da nefelina sienito
ROM – *Run Of Mine*
SC – Santa Catarina
SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
 SiO_2 – Dióxido de silício (sílica)
 SO_3 – Óxido de enxofre
SrO – Óxido de estrôncio
sss – Saturado superfície seca
UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
ZnO – Óxido de zinco

LISTA DE SÍMBOLOS

% – Porcentagem
°C – Graus Celsius
≥ – Maior ou igual que
≤ – Menor ou igual que
cm – Centímetro
cm² – Centímetro quadrado
cm³ – Centímetro cúbico
g/cm² – Grama por centímetro quadrado
g/cm³ – Grama por centímetro cúbico
h – Hora
kg – Quilograma
kg/m³ – Quilograma por metro cúbico
m – Metro
m² – Metro quadrado
m³ – Metro cúbico
mm – Milímetro
min – Minuto
mNm – Milinewton-metro
MPa – Mega Pascal
Nm – Newton-metro
N/s – Newton segundo
rpm – Rotações por minuto
s – Segundo
s⁻¹ – 1/segundo
μ – Micro
μm – Micrômetro
μNm – Micronewton-metro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	ARGAMASSAS	19
2.1.1	Materiais constituintes.....	19
2.1.2	Propriedades requeridas.....	21
2.2	REOLOGIA	24
2.2.1	Reologia das argamassas	26
2.2.2	Caracterização reológica de argamassas.....	27
2.2.2.1	Índice de consistência.....	28
2.2.2.2	Reometria rotacional	29
2.3	RESÍDUO DA NEFELINA SIENITO	31
3	MATERIAIS	34
3.1	AGREGADOS	34
3.2	AGLOMERANTES	34
3.3	ÁGUA	35
3.4	BLOCOS CERÂMICOS	35
4	MÉTODOS	36
4.1	ETAPA I – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	37
4.1.1	Análise química	37
4.1.2	Análise morfológica.....	37
4.1.3	Análise física	38
4.2	ETAPA II – DESENVOLVIMENTO DAS ARGAMASSAS	39
4.2.1	Definição das dosagens.....	39
4.2.2	Preparo das argamassas	40
4.3	ETAPA III – ANÁLISE TÉRMICA DO CIMENTO.....	41
4.4	ETAPA IV – ANÁLISE REOLÓGICA DAS ARGAMASSAS	42
4.4.1	Índice de consistência.....	42
4.4.2	Reometria rotacional.....	43
4.5	ETAPA V – ANÁLISE FÍSICA E MECÂNICA DAS ARGAMASSAS	45
4.5.1	Teor de ar	46

4.5.2	Retenção de água.....	46
4.5.3	Densidade de massa no estado fresco	47
4.5.4	Densidade de massa no estado endurecido	47
4.5.5	Absorção de água por capilaridade	47
4.5.6	Resistência à tração na flexão e à compressão.....	48
4.5.7	Resistência à compressão de prisma.....	48
4.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
5.1	ETAPA I – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	51
5.1.1	Análise química	51
5.1.2	Análise morfológica.....	52
5.1.3	Análise física	54
5.2	ETAPA III – ANÁLISE TÉRMICA DO CIMENTO.....	59
5.3	ETAPA IV – ANÁLISE REOLÓGICA DAS ARGAMASSAS	62
5.3.1	Índice de consistência.....	62
5.3.2	Reometria rotacional.....	64
5.3.3	Correlações entre o índice de consistência e a reometria rotacional.....	69
5.4	ETAPA V – ANÁLISE FÍSICA E MECÂNICA DAS ARGAMASSAS	71
5.4.1	Teor de ar.....	71
5.4.2	Retenção de água.....	72
5.4.3	Densidade de massa.....	74
5.4.4	Absorção de água por capilaridade	75
5.4.5	Resistência à tração na flexão e à compressão.....	77
5.4.6	Resistência à compressão de prisma.....	79
6	CONCLUSÃO.....	83
6.1	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	84
	REFERÊNCIAS.....	86

1 INTRODUÇÃO

A extração desenfreada de matérias-primas e a elevada geração de resíduos sólidos, integram a lista de preocupações da Organização das Nações Unidas (ONU) que, em 2015, estabeleceu ações com o propósito de que os países alcancem o desenvolvimento sustentável até 2030. Dentre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável propostos, o uso eficiente dos recursos naturais e a redução substancial da geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso aparecem, a fim de garantir padrões sustentáveis e responsáveis de produção e consumo (UNITED NATIONS, [s.d.]).

Da quantidade de recursos naturais extraídos anualmente (incluindo minerais industriais, combustíveis fósseis e materiais de construção), os agregados para a construção correspondem a maior parcela de extração. Os agregados, miúdo e graúdo, representam o maior volume de material sólido extraído globalmente e se encontram na segunda posição dos recursos naturais mais consumidos na terra, ficando atrás apenas da água. Estima-se que sejam extraídos até 50 bilhões de toneladas de agregados anualmente no mundo e, desse valor, cerca de 30 bilhões de toneladas são consumidos pela indústria da construção civil para a produção, principalmente, de concretos e argamassas (KOEHNKEN; RINTOUL, 2018; UNEP, 2014).

Nesse cenário, o setor da construção civil é considerado o maior consumidor desses recursos minerais e esse fato pode ser atribuído ao rápido desenvolvimento urbano, que requer a construção de edifícios, rodovias, pontes, escolas, hospitais e demais infraestruturas, que impulsionam a demanda por matérias-primas, sobretudo, por agregado miúdo (KOEHNKEN *et al.*, 2020; PŘIKRYL *et al.*, 2016).

Os efeitos da exploração excessiva do agregado miúdo são cumulativos e acarretam negativamente no ambiente físico, biológico, químico e social do local minerado (RENTIER; CAMMERAAT, 2022), como no alargamento, rebaixamento e erosão do leito dos rios, na redução de bancos de areia, levando à diminuição da diversidade de espécies aquáticas, na redução no tamanho de sedimentos, no aumento da inclinação do rio por meio da remoção de material e na redução da qualidade da água, do ar e do solo devido à poluição (KATZ-LAVIGNE; PANDEY; SUYKENS, 2022; KOEHNKEN; RINTOUL, 2018). Além disso, esse material não completa um ciclo geológico ao longo da vida humana e, por essa razão, é considerado um recurso finito e não renovável (PŘIKRYL *et al.*, 2016).

Em 2015, Edwards (2015) já alertava sobre a demanda insaciável por agregado miúdo e que a dependência excessiva da economia nesse material iria na contramão de qualquer estratégia de desenvolvimento sustentável. As preocupações ambientais se intensificam,

quando a taxa de extração excede os processos naturais de renovação do recurso (MATTAMANA; VARGHESE; KICHU, 2013) e, segundo Rentier e Cammeraat (2022), atualmente se extrai o dobro da quantidade de agregado miúdo que é produzido pela natureza em um mesmo período de tempo. Além disso, cálculos recentes apontam que o mundo pode ficar sem essa matéria-prima até o ano de 2050, caso continue com a taxa de extração atual (SVERDRUP; KODA; SCHLYTER, 2017), intensificando, assim, a procura por materiais alternativos ao agregado miúdo para o desenvolvimento de concretos e argamassas.

Em paralelo à essa situação, os resíduos de mineração, provenientes da extração e do processamento de rochas, constituem atualmente um dos maiores fluxos de resíduos do mundo (KINNUNEN *et al.*, 2018). Estima-se que a quantidade de resíduos de mineração gerados mundialmente ultrapasse 100 bilhões de toneladas todos os anos (TAYEBI-KHORAMI *et al.*, 2019). Estes resíduos, geralmente dispostos em barragens, pilhas ou em aterros, provocam efeitos duradouros e catastróficos no meio ambiente, na sociedade e nos ecossistemas (YILDIZ, 2020) e, dentre outras repercussões, estão o desmatamento, a poluição da água e do ar, a contaminação dos ecossistemas, problemas de saúde pública, mudanças climáticas e o colapso de barragens (GAVRILETEA, 2017; KOLALA; UMAR, 2019).

Como é o caso do beneficiamento da nefelina sienito, onde cerca de 25 % da rocha beneficiada é descartada durante o processo, sendo considerado pela indústria um resíduo do beneficiamento (VOLKMANN, 2004). No estado de Santa Catarina, em 2018, aproximadamente 30 mil toneladas de material foram descartadas ao final do beneficiamento da rocha, consideradas como resíduos do beneficiamento da nefelina sienito. Esses resíduos correspondem a um pouco mais de 23 % da rocha bruta beneficiada (BRASIL, 2019).

Diante deste cenário, medidas eficazes de gestão dos resíduos de mineração tornam-se cada vez mais indispensáveis (MAYER; BHANDARI; GÄTH, 2019; RAUPP-PEREIRA *et al.*, 2008). Um caminho para uma adequada gestão, segundo Gedam *et al.* (2021), é a partir da implementação de uma economia circular, que defende a reutilização de resíduos como matérias-primas para novos produtos, substituindo a tradicional produção linear de extrair, produzir, consumir e descartar.

A valorização de um resíduo por meio da sua utilização como fonte alternativa em cadeias produtivas, onde o resíduo de um setor se torna matéria-prima para outro, pode ser chamada de simbiose industrial (VILAÇA *et al.*, 2022) e constitui uma estratégia potencial para a valorização de um resíduo de mineração, como o proveniente do beneficiamento da nefelina sienito, possibilitando que o resíduo gerado pelo setor da mineração seja inserido no setor da construção civil como matéria-prima para o desenvolvimento de argamassas.

Diversos estudos (AZEVEDO *et al.*, 2019; BARROS *et al.*, 2016; MEDEIROS *et al.*, 2019; NASCIMENTO *et al.*, 2020; SANTOS, 2015) sugerem a valorização de resíduos de mineração em argamassas. Todavia, para que ocorra a viabilidade técnica de aplicação de um material alternativo em substituição ao convencional, faz-se necessário compreender as suas propriedades e o seu comportamento dentro da matriz cimentícia. Haja vista, que a utilização de um resíduo em uma argamassa pode ocasionar um comportamento diferente em relação às propriedades reológicas, físicas e mecânicas, quando comparado às argamassas preparadas com agregados convencionais (BARROS; NEVES; MENEZES, 2017).

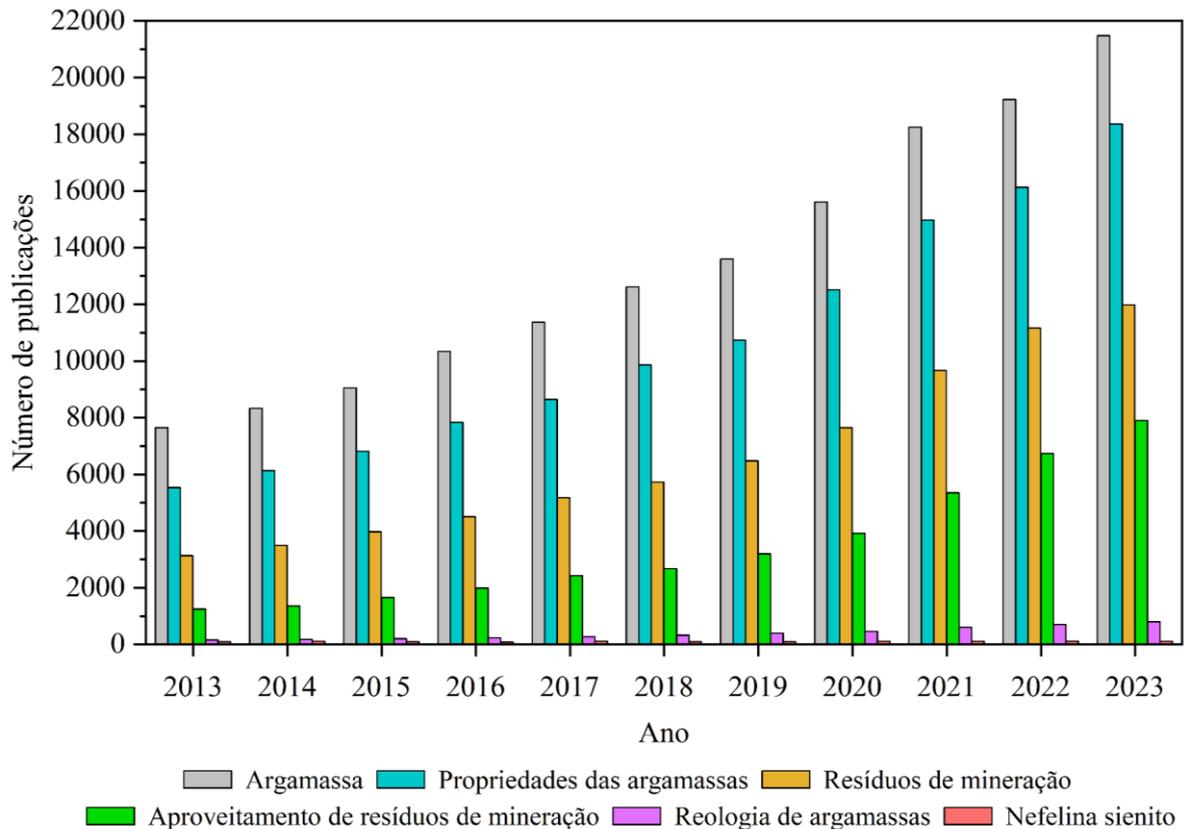
A argamassa de assentamento, amplamente utilizada na construção civil para fazer a união entre elementos de elevação de alvenaria, como blocos cerâmicos ou de concreto, precisa apresentar determinadas propriedades para ser considerada adequada pelo profissional e, ainda, necessita atender às solicitações técnicas a ela impostas (MARVILA *et al.*, 2019). Em seu estado fresco, necessita dispor de uma boa trabalhabilidade, ou seja, baixa viscosidade suficiente para permitir seu manuseio e aplicação, ao mesmo tempo apresentar uma tensão limite de escoamento considerável, tendo em vista que, após aplicada, deve permanecer em contato com a superfície, sem escoar (AZEVEDO *et al.*, 2017; SOUZA; BAUER, 2002). Já em seu estado endurecido, deve apresentar uma resistência à compressão e à tração na flexão suficientes para suportar as cargas da estrutura (NALON *et al.*, 2021).

Inúmeros fatores influenciam no comportamento dessas propriedades, como o tamanho, a forma, a massa unitária e a porosidade do agregado miúdo, assim como a capacidade de adesão interfacial entre os constituintes da matriz, as proporções desses constituintes, dentre outros aspectos (REN *et al.*, 2021; RISSANEN *et al.*, 2018). Devido a essas diversas influências, é de extrema importância o estudo do comportamento de argamassas desenvolvidas com agregados não convencionais, principalmente em relação às propriedades reológicas, dado que a trabalhabilidade é uma propriedade essencial, mas de difícil mensuração. E por meio do método de reometria rotacional, que supera as limitações de métodos tradicionalmente utilizados, é possível avaliar a fluidez da mistura, visando a viabilidade da valorização do resíduo (AZEVEDO *et al.*, 2017; CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009).

Uma pesquisa na base de dados do *Science Direct* (2023) foi realizada com o intuito de levantar o número de publicações relacionadas aos temas principais do presente estudo, entre os anos de 2013 e 2023. Os termos pesquisados foram: argamassas, propriedades das argamassas, resíduos de mineração, aproveitamento de resíduos de mineração, reologia de argamassas e nefelina sienito. A partir da representação gráfica da Figura 1, pode-se constatar

um aumento gradativo no número de publicações relacionados aos termos. Esse cenário demonstra o interesse crescente da comunidade científica nos tópicos abordados neste estudo.

Figura 1 – Representação gráfica do número de publicações relacionadas aos termos principais da pesquisa entre os anos de 2013 e 2023.



Fonte: Autora (2024).

Destaca-se, ainda, a quantidade de publicações relacionadas às argamassas, totalizando 147.520 publicações e relacionadas às propriedades das argamassas, com 117.511 publicações, entre 2013 e 2023. Em seguida estão as publicações relacionadas aos resíduos de mineração e o aproveitamento de resíduos de mineração, com 72.925 e 38.401 publicações, respectivamente. Por fim, os dois últimos tópicos com menor quantidade de publicações, sendo eles: reologia de argamassas com 4.296 publicações e nefelina sienito com 1.102 publicações.

Ainda sobre a pesquisa na base de dados do *Science Direct* (2023), constatou-se a carência de estudos sobre o comportamento reológico, físico ou mecânico de argamassas desenvolvidas com o resíduo da nefelina sienito. Inclusive, de acordo com os dados apresentados na Figura 1, nos últimos anos há uma baixa quantidade de publicações relacionadas com a rocha nefelina sienito e carência de pesquisas com foco nas propriedades

e/ou aplicações do resíduo oriundo de seu beneficiamento. Esse panorama reforça a importância de estudos pertinentes ao resíduo do beneficiamento da nefelina sienito, em relação às suas propriedades e desempenho, bem como aplicação como agregado miúdo em argamassas.

Nesse contexto, o resíduo proveniente do beneficiamento da nefelina sienito foi investigado como uma alternativa potencial ao agregado miúdo para o desenvolvimento de argamassas, especialmente em relação às propriedades reológicas do sistema composicional cerâmico de estudo, com o intuito de reduzir a demanda por agregado miúdo convencional (fonte primária) e, concomitantemente, impulsionar o desenvolvimento sustentável por meio da valorização de resíduos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Investigar o comportamento reológico, físico e mecânico de argamassas para a valorização do resíduo do beneficiamento da nefelina sienito como agregado miúdo.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Identificar as potencialidades do resíduo da nefelina sienito por meio de análises química, morfológica e física, para a definição da função componente do material nas argamassas de estudo;
- b) Estabelecer os parâmetros composicionais da argamassa de assentamento, bem como de processamento, necessários para o desenvolvimento de avaliações de desempenho dos materiais utilizados;
- c) Analisar as propriedades reológicas das argamassas desenvolvidas com o resíduo da nefelina sienito, de forma a verificar sua viabilidade e aplicação no setor da construção civil;
- d) Investigar as propriedades físicas e mecânicas das argamassas desenvolvidas com o resíduo da nefelina sienito, de modo a verificar sua potencialidade e utilização no setor da construção civil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ARGAMASSAS

As argamassas são amplamente utilizadas na construção civil e desempenham um papel fundamental desde o início aos acabamentos finais de uma obra. A classificação desses materiais normalmente é realizada com base em suas finalidades, podendo ser classificada como uma argamassa de revestimento de paredes e tetos, argamassa de contrapiso, argamassa colante para o assentamento de placas cerâmicas, argamassa de reparo para a recuperação de estruturas e, ainda, como uma argamassa de assentamento para a elevação de alvenaria, sendo essa última considerada a argamassa mais empregada na construção civil (CARASEK, 2017).

A argamassa de assentamento precisa exercer diversas funções quando utilizada como junta na elevação de alvenaria, como unir os blocos cerâmicos, contribuir para a resistência aos esforços laterais, garantir estanqueidade das juntas à penetração de água das chuvas, distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede e absorver as deformações sujeitas à alvenaria. Torna-se, portanto, fundamental que a argamassa de assentamento apresente algumas propriedades essenciais para que desempenhe com êxito todas essas funções, sendo as principais a trabalhabilidade, relacionada diretamente com a consistência e plasticidade da argamassa, bem como uma adequada retenção de água, aderência, resistência mecânica e capacidade para absorver deformações (CASALI, 2008; FILOMENO, 1993).

2.1.1 Materiais constituintes

A argamassa é obtida a partir da mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerantes, como o cimento Portland e a cal, e água, podendo conter aditivos e adições minerais (ABNT, 2013). A compreensão das características destes materiais de forma individual é de suma importância, pois todos influenciam nas propriedades e no desempenho do produto final. No entanto, nesta pesquisa o foco foi dado, principalmente, para o agregado, haja vista que se pretende analisar a influência do resíduo da nefelina sienito em substituição ao agregado convencional e que os demais constituintes foram mantidos constantes.

O agregado miúdo, tipicamente a areia, compõe majoritariamente a composição da argamassa, em cerca de 60 a 80 % de seu volume (CARASEK, 2017). Este constituinte é responsável por servir como material de enchimento, evitar variações volumétricas por secagem, além de melhorar a resistência à abração da argamassa (NEVILLE, 2016); além disso,

pode influenciar fortemente em propriedades como porosidade, aderência, resistência à compressão, módulo de elasticidade, retração, entre outras (SANTOS, 2015).

O agregado miúdo comumente empregado para o desenvolvimento de argamassas é a areia natural, constituída essencialmente de quartzo e extraída do leito de rios. Entretanto, nos últimos anos, diversos estudos surgiram visando a substituição parcial e/ou integral do agregado miúdo convencional por resíduos de construção e demolição (RCD), resíduos da produção cerâmica, por resíduos da mineração, dentre outros (NETO *et al.*, 2016).

O tamanho das partículas do agregado (ABNT, 1993) exerce grande efeito nas propriedades da argamassa, visto que areias grossas (2 a 1,2 mm) tendem a aumentar a resistência à compressão e reduzir a trabalhabilidade, as areias médias (1,2 a 0,42 mm) tendem a apresentar melhor trabalhabilidade e as areias finas (0,42 a 0,075 mm) por sua vez, aumentam a demanda de água, acarretando em uma queda da resistência à compressão, podem levar a um consumo maior de cimento (antieconômico), mas em contrapartida, melhoram a aderência da argamassa. Desta forma, uma distribuição do tamanho de partículas bem graduada, produzirá argamassas mais econômicas, trabalháveis e uma estrutura mais fechada, com menor índice de vazios, contribuindo para uma melhor resistência mecânica (CASALI, 2008; PRUDÊNCIO JR.; OLIVEIRA; BEDIN, 2002; SBRIGHI NETO, 2011).

Além do tamanho do agregado, a forma e o aspecto da superfície também influenciam nas características do produto final. As partículas arredondadas escoam mais facilmente e, com isso, aumentam a fluidez com uma menor quantidade de água, resultando em uma maior resistência mecânica. Por outro lado, partículas lamelares ou muito irregulares, afetam negativamente a trabalhabilidade, exigindo maior quantidade de água, ocasionando uma diminuição da resistência mecânica. Já partículas com superfície lisa, podem acarretar em uma aderência menor entre a pasta de cimento e o agregado, comparado a um agregado com superfície rugosa (FARIAS; PALMEIRA; BEJA, 2017; SBRIGHI NETO, 2011).

O cimento Portland é um elemento fundamental na composição da argamassa, pois propicia resistência mecânica, aumento da aderência e contribui para a trabalhabilidade e retenção de água (PRUDÊNCIO JR.; OLIVEIRA; BEDIN, 2002). Em geral, qualquer tipo de cimento pode ser utilizado no preparo de argamassas; todavia, deve-se ter atenção com a finura do material, pois cimentos muito finos podem proporcionar argamassas mais trabalháveis e com maior retenção, por outro lado, podem gerar maior retração plástica, comprometendo o desempenho do produto. O cimento em uma quantidade insuficiente no traço, pode acarretar na desagregação da argamassa, já em uma quantidade excessiva, eleva a rigidez, retração, fissuração e descolamento, resultando em uma argamassa menos durável (CARASEK, 2017).

A cal hidratada, composta essencialmente por hidróxidos de cálcio, contribui em importantes propriedades da argamassa, como aumento da plasticidade, da coesão e da retenção de água. Além disso, argamassas contendo cal preenchem de maneira mais rápida e completa toda a superfície do substrato, promovendo uma alta extensão da aderência. Comparativamente a uma argamassa somente de cimento, o uso da cal propicia uma estrutura mais densa e com menor incidência de microfissuras na matriz, neste sentido, argamassas mistas de cimento e cal são consideradas superiores às argamassas somente de cimento, pois reúnem as qualidades de ambos os materiais (CARASEK, 2017; CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2017).

A água, em uma argamassa no estado fresco, é o agente que promove a diminuição do atrito entre os materiais por meio de uma película que envolve as partículas e que propicia a aglutinação dos constituintes, sendo considerada o principal componente que influencia a trabalhabilidade da mistura (ISAIA, 2011). Deve-se evitar a presença de sais solúveis na água, pois podem acelerar a pega e gerar eflorescência, bem como a presença de matéria orgânica que, por sua vez, pode retardar a pega e o endurecimento da argamassa. À vista disso, recomenda-se o uso de água potável da rede pública de abastecimento. Sua dosagem deve ser suficiente para garantir a trabalhabilidade no estado fresco, sem que cause a segregação dos materiais, prejudicando a eficiência da argamassa (CARASEK, 2017).

A dosagem destes constituintes é feita com a intenção de obter a melhor proporção entre eles e depende diretamente da função que a argamassa exercerá. Traço é o termo utilizado para expressar a quantidade dos elementos que compõe as argamassas e pode ser dado em massa, com controle mais rigoroso, ou em volume, comumente utilizado nos canteiros de obra (ISAIA, 2011). Uma argamassa com o traço em volume de 1:2:9 (cimento:cal:agregado) representa 1 parte de cimento, para 2 partes de cal, para 9 partes de agregado. Segundo Sabbatini (1986), esta proporção de 1:3 (aglomerantes:agregado) apresenta características adequadas para o desempenho da argamassa e garante, devido à proporção de aglomerantes e agregado, uma quantidade suficiente de pasta para preencher os vazios dos agregados.

2.1.2 Propriedades requeridas

Para desempenhar com êxito todas as suas funções, é imprescindível que a argamassa de assentamento apresente determinadas propriedades tanto em seu estado fresco (curto período no qual encontra-se plástica com capacidade de mistura e aplicação), quanto no endurecido (período no qual ocorre o endurecimento) (CARASEK, 2017). No Quadro 1 estão apresentadas as principais propriedades requeridas para a argamassa fresca e endurecida.

Quadro 1 – Principais propriedades requeridas para a argamassa de assentamento.

Propriedades	Definição
Trabalhabilidade	Determina a facilidade com que se mistura, se transporta, se manuseia e se aplica a argamassa
Consistência	Maior ou menor facilidade de deformar uma argamassa sob ação de cargas, ou seja, quanto menos consistente, mais fluida ela é
Retenção de água	Capacidade de manter a trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provoquem a perda de água
Densidade de massa	Indicativo da compacidade da argamassa: quanto mais leve for, menor o esforço do profissional
Adesão	Capacidade de união inicial da argamassa fresca ao substrato
Resistência à compressão	Tensão máxima que a argamassa suporta quando submetida a um esforço de compressão
Resistência à tração na flexão	Tensão máxima que a argamassa suporta quando submetida a um esforço de tração ocasionado pela flexão à compressão

Fonte: Adaptado de Carasek (2017, p. 922-969).

A trabalhabilidade, apesar de não possuir uma classificação normativa, é tida como uma das propriedades mais importantes no estado fresco da argamassa. Sua avaliação provém da combinação de várias outras propriedades (consistência, coesão, retenção de água, plasticidade...), assim como das características do substrato, da habilidade do profissional e da técnica de aplicação empregada. Devido a isso, é considerada uma propriedade complexa de avaliar isoladamente. Na prática, a trabalhabilidade é verificada com base no julgamento do profissional, que leva em consideração a facilidade de manuseio, a adesão na formação das juntas, a consistência e coesão durante um intervalo de tempo e a facilidade no acabamento. No entanto, apesar da complexidade de avaliação desta propriedade, vários métodos são utilizados para medir a consistência da argamassa, dando assim, parâmetros para uma medida indireta da trabalhabilidade (SANTOS, 2015; CARASEK, 2017).

A consistência, por sua vez, pode ser avaliada por meio de diferentes ensaios laboratoriais, os quais expressam um valor numérico para a caracterização da fluidez da argamassa. O método da mesa de consistência (também conhecida como mesa de fluxo ou *flow table*), da penetração do cone e do *dropping ball* embora sejam de fácil execução e comumente utilizados, apresentam limitações para definir completamente o comportamento das argamassas no estado fresco. À vista disso, para uma melhor compreensão deste comportamento, autores recomendam uma abordagem aprofundada a respeito da reologia do material, utilizando métodos como a reometria rotacional ou o *squeeze-flow* (CARASEK, 2017).

A capacidade de retenção de água também está diretamente relacionada com a trabalhabilidade, uma vez que uma argamassa com baixa retenção enrijecerá rapidamente, prejudicando o tempo disponível de manuseio, aplicação e acabamento. Acrescenta-se uma quantidade de água além do necessário para a hidratação dos aglomerantes, de forma a conferir uma trabalhabilidade adequada. Todavia, parte dessa água é evaporada ou absorvida pelo substrato, sendo essa movimentação da água prejudicial à argamassa, interferindo em propriedades como a resistência mecânica, a aderência e podendo ocasionar uma maior retração no estado endurecido. Esta propriedade é comumente avaliada por meio do método do Funil de Büchner modificado (SOUSA; LARA, 2005).

A densidade de massa, também denominada de massa específica, está relacionada com o esforço exercido pelo profissional durante o manuseio e aplicação da argamassa. Quanto menor a densidade de massa (mais leve), menor o esforço, resultando em um aumento da produtividade. A densidade de massa varia com o teor de ar contido, principalmente se utilizado aditivo incorporador de ar, bem como com a massa específica e unitária dos constituintes, sobretudo do agregado. Esta propriedade é analisada nos estados fresco e endurecido com base na relação entre a massa e o volume do material (NAKAKURA; CINCOTTO, 2004).

A propriedade de adesão está relacionada com as características reológicas do material, em especial com a tensão superficial da pasta aglomerante. Visto que, quanto menor for a tensão, maior o molhamento do material com o substrato, reduzindo o ângulo de contato entre as superfícies (maior contato físico da pasta com o agregado e, também, com o substrato) que, conseqüentemente, favorece a união entre os elementos. Essa propriedade pode ser modificada alterando a composição da argamassa, sendo que a adição de cal e de cimento diminuem a tensão superficial, contribuindo para um molhamento mais efetivo. Não existe um método normalizado no Brasil para avaliar a adesão, no entanto um ensaio qualitativo para avaliar a adesividade da argamassa é proposto pela RILEM MR-5 (CARASEK, 2017).

A resistência mecânica da argamassa está relacionada à sua capacidade de resistir aos esforços mecânicos, principalmente de compressão e de flexão, decorrentes de cargas estáticas ou dinâmicas. Comumente, determina-se a resistência à compressão para argamassas de assentamento, dado a forma à qual ela é solicitada no sistema de vedação. Uma argamassa com elevada resistência à compressão tende a ser muito rígida, podendo ocasionar fissurações; por outro lado, uma argamassa com baixa resistência pode provocar a ruptura da alvenaria por esmagamento das juntas. Desta forma, a resistência à compressão da argamassa deve obedecer aos limites normativos, a fim de proporcionar uma resistência adequada do sistema (NAKAKURA; CINCOTTO, 2004).

2.2 REOLOGIA

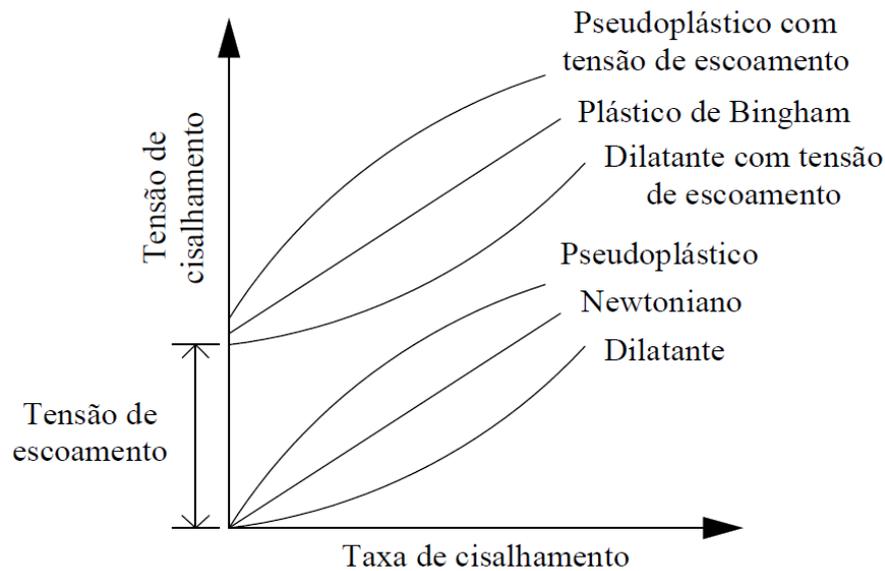
A reologia é definida como a ciência que estuda o fluxo e a deformação dos materiais, avaliando as relações entre a tensão de cisalhamento e a deformação (taxa de cisalhamento) ocorrida em um determinado tempo. A importância da compreensão da reologia no processamento de materiais cerâmicos é em virtude da necessidade de mistura, transporte, bombeamento, aplicação e acabamento desses materiais, envolvendo, em pelo menos uma etapa, a dispersão de pós em um líquido, de modo a obter um fluido (ORTEGA *et al.*, 1997).

A viscosidade é a principal propriedade reológica de um fluido e pode ser entendida como a quantificação da fricção interna do material. Quanto maior essa fricção, maior será a energia necessária para movimentar uma camada em relação a outra (CARDOSO, 2009). Isto é, quando um fluido é submetido a uma tensão e ele flui de maneira rápida, pode-se chamá-lo de pouco viscoso, como a água. Já se o fluido possui certa resistência a escoar (fluidez baixa), pode-se chamá-lo de um fluido viscoso, como um óleo (SILVA; JÚNIOR; JÚNIOR, 2019).

A caracterização reológica de um fluido, comumente realizada em instrumentos como viscosímetros e reômetros, determina as curvas de fluxo geradas pela relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento de uma amostra. Com base nas curvas geradas, é possível classificar a amostra como um fluido newtoniano, onde a viscosidade é constante, ou seja, independe da taxa de cisalhamento, ou classificar como um fluido não-newtoniano, onde a viscosidade depende da taxa de cisalhamento. A viscosidade, neste último caso, é chamada de viscosidade aparente, podendo aumentar ou diminuir dependendo das características do fluido (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011; FERREIRA *et al.*, 2005).

Os valores de viscosidade, para alguns fluidos, diminuem com o aumento da taxa de cisalhamento, nesta situação, o material apresenta um comportamento pseudoplástico. Já o comportamento dilatante, refere-se ao aumento da viscosidade devido ao aumento da taxa de cisalhamento. Já quando o escoamento do fluido ocorre somente após a aplicação de determinada tensão, o material é caracterizado como um fluido de Bingham. Nesse comportamento, o material se comporta como sólido elástico para valores abaixo da tensão mínima e essa tensão mínima é chamada de tensão de escoamento. Após iniciado o escoamento, o fluido pode apresentar qualquer um dos comportamentos já descritos (ORTEGA *et al.*, 1997). Na Figura 2 pode ser visualizada a classificação dos fluidos de acordo com o comportamento da curva de fluxo.

Figura 2 – Classificação dos fluidos de acordo com o comportamento da curva de fluxo.

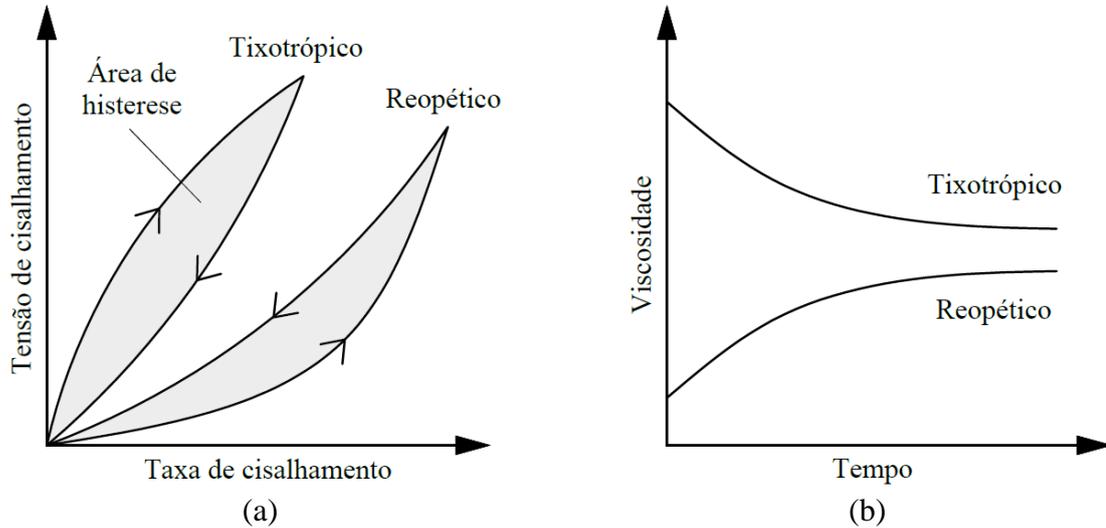


Fonte: Adaptado de Kawatra e Bakshi (1996, p. 277).

Além disso, se houver redução da viscosidade em função do tempo, o fluido será tixotrópico que, por via de regra, é comumente observado em materiais cimentícios. Nesse fenômeno, a curva de viscosidade ascendente se situa acima da curva descendente e a região formada entre ambas as curvas é denominada área de histerese. A área de histerese corresponde ao grau de tixotropia do material e por meio dela é possível realizar uma análise qualitativa do cisalhamento e obter informações em relação à estabilidade estrutural do material (CARLESSO, 2015).

Já no caso de a viscosidade aumentar em função do tempo, tem-se um fluido reopético, que apresenta um comportamento oposto ao tixotrópico, onde a curva de viscosidade ascendente se situa abaixo da curva descendente (ORTEGA *et al.*, 1997). A Figura 3 ilustra uma representação esquemática do comportamento de fluidos tixotrópicos e reopéticos, em função da taxa de cisalhamento e em função do tempo.

Figura 3 – Representação esquemática dos comportamentos tixotrópico e reopético: (a) em função da taxa de cisalhamento resultando em uma área de histerese; (b) em função do tempo sob uma taxa de cisalhamento constante.

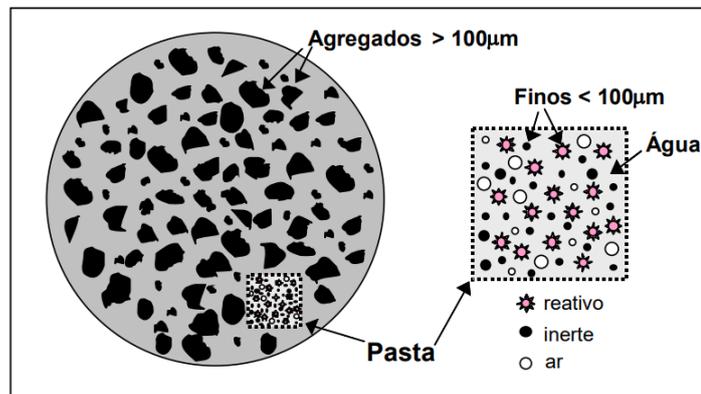


Fonte: Adaptado de Betioli (2007, p. 57).

2.2.1 Reologia das argamassas

As argamassas podem ser compreendidas, do ponto de vista reológico, como suspensões bifásicas concentradas, isto é, compostas por uma fração inerte grossa (agregado miúdo) e por uma pasta reativa (cimento, cal e água), conforme ilustrado esquematicamente na Figura 4. As argamassas são tidas como suspensões altamente concentradas de sólidos em líquidos e com um comportamento reológico complexo, devido à natureza bifásica e reativa e, também, às diversas solicitações submetidas nas etapas de mistura, bombeamento, lançamento, aplicação e acabamento (CARASEK, 2017; CARDOSO, 2009).

Figura 4 – Representação esquemática da microestrutura de uma argamassa fresca.



Fonte: Cardoso (2009, p. 6).

As partículas sólidas que se encontram em uma suspensão altamente concentrada, como as argamassas, geram perturbações nas linhas de fluxo que, conseqüentemente, aumentam a resistência ao escoamento, implicando em um aumento da viscosidade. Além disso, as características reológicas destes fluidos dependem, além da concentração de sólidos, da temperatura, do tempo decorrido desde o início da mistura, dos constituintes, das características físicas das partículas (distribuição do tamanho, densidade, morfologia, área de superfície e rugosidade), da sequência e intensidade de mistura, dentre outros fatores (ARCARO, 2016; BENTZ *et al.* 2012; CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2000).

A avaliação da trabalhabilidade de uma argamassa em um canteiro de obras, é comumente efetuada de forma sensorial e tátil, onde o profissional classifica a argamassa conforme sua facilidade ou dificuldade em manuseá-la. No entanto, este empirismo deveria ser descartado a favor de parâmetros físicos mensuráveis, como os descritos no estudo da reologia (DANTAS *et al.*, 2021). Uma argamassa, de forma geral, deve apresentar um baixo coeficiente de viscosidade para facilitar seu manuseio, aplicação e acabamento, mas com uma considerável tensão de escoamento para se manter estável e permanecer em contato ao substrato sem que ocorra descolamento ou escorregamento. No entanto, há limitações na generalização de um comportamento ideal para as argamassas, haja vista que cada método de aplicação e cada finalidade do material demandará características específicas (CARDOSO, 2009).

Portanto, o estudo reológico das argamassas é de extrema relevância para o entendimento de seu comportamento, especialmente em seu estado fresco, em razão das tensões nelas impostas e da contenção dos componentes na matriz, influenciando na sua eficiência e em seu desempenho. A partir da avaliação reológica, é possível realizar uma análise quanto à consistência e fluidez e a conseqüente viabilidade de uso de uma argamassa, visando a otimização do seu desempenho (AZEVEDO *et al.*, 2017; CARDOSO *et al.* 2014).

2.2.2 Caracterização reológica de argamassas

O período de uma argamassa em seu estado fresco, apesar de curto em relação ao seu tempo no estado endurecido, exerce grandes conseqüências ao longo de sua vida útil. Em relação a seu comportamento reológico, tradicionalmente caracteriza-se a argamassa fresca de forma limitada a partir de métodos monopontos que não são capazes de dissociar as contribuições da tensão de escoamento ou da viscosidade. São, por exemplo, os métodos da mesa de consistência, de penetração do cone e do *dropping ball*, que utilizam o conceito de trabalhabilidade para avaliar a consistência de argamassas (CARDOSO, 2009).

Métodos que avaliam o comportamento reológico a partir de medições em uma única condição de solitação (monopontos), não definem completamente o comportamento no estado fresco do material. Dado que duas argamassas com constituintes e dosagens distintas, podem apresentar resultados iguais de consistência, contudo uma ser adequada do ponto de vista da trabalhabilidade e outra incapaz de ser aplicada. Isto acontece, pois este comportamento complexo não deve ser descrito por um único valor de medida, mas sim por meio de um perfil reológico que possibilite verificar diferentes condições de tensão e taxa de cisalhamento, como o ensaio de reometria rotacional e o *squeeze-flow* (métodos multipontos) (CARASEK, 2017; CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009; HOPPE *et al.*, 2007).

A trabalhabilidade é considerada um conceito relativo, pois depende de inúmeras variáveis, dentre elas o método de avaliação empregado. São inúmeros os métodos de avaliação reológica, como o de penetração do cone, *dropping ball*, *vane test*, cone de escoamento, *K-Slump*, *squeeze-flow*, mesa de consistência e reometria rotacional. Os dois últimos serão abordados nesta pesquisa e explicados a seguir (CASALI, 2008; SOUSA; LARA, 2005).

2.2.2.1 Índice de consistência

O método da mesa de consistência, também chamado de *flow table test*, é um dos ensaios mais utilizados para avaliar a argamassa no estado fresco. Ele consiste em moldar a argamassa em um molde troncônico, retirar o molde e aplicar sucessivos impactos de queda a uma altura padrão. Após as quedas, mede-se o espalhamento horizontal da argamassa e quanto maior o espalhamento, subentende-se que mais fácil ela se deformará (SILVA *et al.*, 2005).

O ensaio da mesa de consistência considera a tensão de escoamento e a viscosidade do sistema; no entanto, estes valores obtidos não dissociam a contribuição de cada um e são expressos na forma de espalhamento da mistura (valor unitário em milímetros) e não em termos de unidades reológicas fundamentais (KOEHLER; FOWLER, 2003). Por outro lado, segundo Sousa e Lara (2005), este ensaio não caracteriza a tensão de escoamento da argamassa, uma vez que os impactos ultrapassam esta tensão e a viscosidade é avaliada de maneira incompleta, pois só é medida ao final do ensaio e não ao longo do tempo.

No entanto, apesar das limitações descritas, esse ensaio é amplamente utilizado como uma medida indireta da trabalhabilidade de argamassas, devido a sua facilidade de execução, rápido resultado e como uma forma de controle tecnológico de argamassas. Além disso, o resultado pode auxiliar na determinação da relação água/aglomerantes como o ponto de partida para o desenvolvimento tecnológico de argamassas com a valorização de resíduos.

2.2.2.2 Reometria rotacional

A reometria rotacional tem sido utilizada para superar as limitações dos métodos tradicionalmente utilizados. A partir dela, determina-se o comportamento reológico de argamassas, por meio da tensão e da taxa de cisalhamento, associadas a um sistema de medição específico (equipamento). Assim, a medição reológica torna-se uma importante ferramenta para o controle da tensão de escoamento e da viscosidade de argamassas em diferentes taxas de cisalhamento (BANFILL, 1990; CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009).

Os reômetros permitem estudar o comportamento do fluido em função de variáveis, como o tempo e a temperatura. Estes equipamentos apresentam diversas geometrias, sendo possível avaliar o material em diferentes situações. Devido ao seu funcionamento automatizado, os reômetros são capazes de fornecer informações mais precisas e confiáveis do que os ensaios convencionais, de modo a aumentar o controle de qualidade do material (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

Esses equipamentos são direcionados à avaliação das propriedades reológicas de fluidos homogêneos, todavia, do ponto de vista reológico e devido à sua ampla distribuição no tamanho de partículas, as argamassas não podem ser consideradas suspensões homogêneas. Desta forma, a interpretação da caracterização desse material, em termos de tensão e taxa de cisalhamento, torna-se imprecisa. Utiliza-se, à vista disso, a análise direta das forças por meio do torque (correspondendo a tensão de cisalhamento), que resultam da velocidade de rotação (correspondendo a taxa de cisalhamento) da argamassa (PILEGGI *et al.*, 2000).

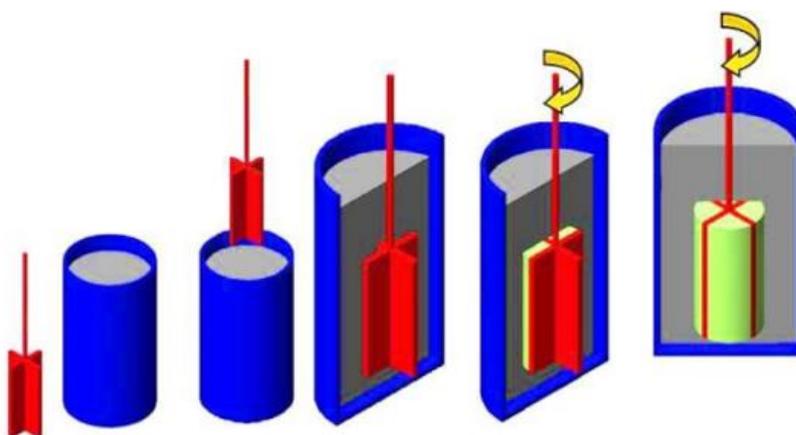
Uma limitação, contudo, é a capacidade de torque do equipamento quando se avalia materiais com altas densidades e tamanhos de partículas, como as argamassas. Além disso, devido à consistência das argamassas, pode ocorrer deslizamento e perda de contato entre o material e o equipamento, comprometendo a avaliação. No entanto, de acordo com Carlesso (2015), este método é uma importante ferramenta para caracterizar detalhadamente os materiais cimentícios, que possuem comportamento de um fluido plástico ou Binghamiano, pois apresentam em repouso uma estrutura tridimensional com rigidez suficiente para resistir a qualquer tensão inferior à tensão de escoamento e quando a tensão de escoamento é excedida, a estrutura se desintegra e o sistema se comporta como um fluido Newtoniano, voltando a se recuperar com a redução da tensão de cisalhamento e da tensão de escoamento.

Em termos construtivos, o reômetro, em sua parte inferior, possui uma mesa fixa para acoplar a geometria de dimensões precisas, onde coloca-se o material a ser avaliado. Na parte superior, possui uma cabeça móvel com motor de tensão controlada de precisão, onde

acopla-se a haste ao conjunto de medição reológica. Essa haste é utilizada para rotacionar o material e nela é possível fixar diferentes sistemas geométricos existentes, conhecidos como *spindles*, onde a escolha depende do tipo de fluido analisado, da sua faixa de viscosidade e da sua taxa de deformação (CARLESSO, 2015).

Para argamassas, devido à sua distribuição de tamanhos de partículas, recomenda-se a utilização do sistema Vane (Figura 5), que é caracterizado por uma palheta em cruz, composta por quatro pás de ângulos iguais. Diversos autores (GIORDANI, 2017; LI *et al.*, 2023; SOUSA; LARA, 2005; STOLZ, 2015; VITA, 2011) relatam a utilização do *spindle* Vane e sua vantagem para estudos em argamassas, pois se mostra eficiente para avaliar fluidos densos e que exibem grande efeito de deslizamento, o que ocorre com frequência em outros tipos de dispositivos, como os discos paralelos ou cilindro coaxial.

Figura 5 – Representação esquemática do sistema Vane.



Fonte: Adaptado de Hoppe *et al.* (2007).

Em relação aos parâmetros de ensaio do método de reometria rotacional, a taxa de cisalhamento de estudo de, aproximadamente, 20 s^{-1} é considerada por Giordani (2017) como a ideal para caracterizar uma argamassa, pois corresponde, na maioria dos casos, à máxima tensão de cisalhamento imposta na argamassa (simulando as taxas envolvidas no preparo), servindo como um bom indicativo de análise. A autora acrescenta que os resultados no procedimento experimental de aceleração e em menores taxas, representam melhor o comportamento das argamassas. Cardoso *et al.* (2014) complementam que a aceleração e desaceleração da taxa subentende-se como a destruição e reconstrução estrutural, e que no início do ensaio os valores possuem menores interferências do escorregamento e da segregação do material, quando comparado aos demais tempos de medição.

Ainda sobre os procedimentos de ensaios, os autores Paiva (2005), Petry (2015), Stolz (2015) e Seabra, Labrincha e Ferreira (2007) indicam o uso de patamares para a análise reológica, pois este garante que o torque apresente valores em equilíbrio em cada velocidade de rotação, ou seja, ocorre a estabilização do torque em cada patamar. Neste mesmo sentido, Cardoso *et al.* (2014) alerta para o tempo de estabilização destes patamares, dado que uma duração prolongada do patamar tende a incorporar ar excessivo nas amostras, podendo modificar a homogeneidade do sistema.

O método de reometria rotacional, no entanto, não possui normativas brasileiras especificando seus parâmetros de ensaio para a caracterização de materiais cimentícios. Já no âmbito internacional, a ASTM C1749-17a (ASTM, 2017) e a ASTM C1874-20 (ASTM, 2020) abordam aspectos genéricos sobre a medição reológica de materiais cimentícios. Alguns estudos reológicos (FRANÇA; CARDOSO; PILEGGI, 2012; GIORDANI; MASUERO, 2019; GUPTA; KASHANI; MAHMOOD, 2022; HE *et al.*, 2022; KUDO, 2012; LI *et al.*, 2023; PAIVA, 2005; PETRY, 2015; STOLZ; MASUERO, 2018; WESTERHOLM *et al.*, 2008) já foram realizados com argamassas; no entanto, estes estudos apresentam diferentes metodologias de ensaio (modelos de reômetros e geometrias, procedimento experimental de ensaio, tipos de materiais ensaiados...) e objetivos distintos, dificultando a comparação de resultados (GIORDANI, 2017).

2.3 RESÍDUO DA NEFELINA SIENITO

A nefelina sienito é caracterizada como uma rocha ígnea plutônica, sem a presença de quartzo livre e constituída de feldspatos potássico, sódico e feldspatóides e alguns minerais portadores de ferro. Devido ao seu alto teor de álcalis e alumina, a nefelina é comumente utilizada como fundente para a produção de vidros e cerâmicas, pois atua aprimorando e minimizando custos do processo, em virtude de melhorar a capacidade fluxante, reduzir a temperatura de fusão e a quantidade de outras fontes de fundentes, além de conferir às peças uma maior durabilidade e dureza (McLEMORE, 2009).

Também há registros da utilização da rocha na fabricação de fibras de vidro, na pigmentação e carga para tintas, na indústria de plásticos, como carga para a fabricação de carpetes de espuma (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2008) e como matéria-prima para a fabricação de geopolímeros (GUREVICH; KALINKINA; KALINKIN, 2020). No Brasil, especialmente, a nefelina sienito é a principal substituta do feldspato na produção de cerâmicas, podendo chegar em até 60 % da composição de alguns porcelanatos (SALEM *et al.*, 2009).

O processamento da nefelina sienito é realizado por meio de diversas etapas até se alcançar os produtos finais com o tamanho de partículas adequado e com a pureza necessária. Para as indústrias de vidro e cerâmica, as partículas devem ser inferiores a 0,600 mm e 0,075 mm, respectivamente. Já o teor de óxido de ferro não deve ultrapassar 0,08 % para ambos os processamentos, salvo para a produção de vidros com menor controle de coloração, como o vidro verde ou o âmbar (McLEMORE, 2009). Dentre as etapas que compõe o beneficiamento da rocha, após as etapas de britagem, moagem, peneiramento e aeroclassificação, a separação magnética de alta intensidade é considerada uma etapa fundamental, pois nela ocorre a retirada dos minerais máficos (contendo óxidos e hidróxidos de ferro) que prejudicam a alvura almejada dos vidros e das cerâmicas (FRANÇA; SAMPAIO, 2002).

Apesar da falta de informações atualizadas a respeito das reservas minerais, da quantidade extraída de *ROM* (*Run Of Mine* – minério bruto sem passar por qualquer tipo de beneficiamento) e da quantidade beneficiada de nefelina sienito, de acordo com Sampaio, França, Braga (2008), inúmeras reservas de nefelina sienito são encontradas no Brasil, principalmente nos estados de Minas Gerais, Santa Catarina, São Paulo, Rio de Janeiro e Bahia.

Em relação ao estado de Santa Catarina, conforme BRASIL (2019), cerca de 128 mil toneladas de *ROM* de nefelina sienito foram extraídas e, aproximadamente, 98 mil toneladas foram beneficiadas, somente no ano de 2018. Diante destes dados, subtraindo a quantidade extraída da quantidade beneficiada e considerando que toda quantidade beneficiada foi comercializada ou utilizada, chega-se a um valor de, aproximadamente, 30 mil toneladas de material descartado ao final do beneficiamento, considerado como resíduos do beneficiamento da nefelina sienito. Esses resíduos correspondem a um pouco mais de 23 % da rocha bruta extraída, estando em concordância com Volkmann (2004), que relata que, ao final do processamento, cerca de 25 % da rocha bruta se referem aos resíduos do beneficiamento da nefelina sienito, considerados sem valor econômico ou técnico pelas mineradoras.

Os resíduos de mineração, como os provenientes do beneficiamento da nefelina sienito, são comumente descartados e dispostos em pilhas ou em barragens de contenção. A disposição desses resíduos, apesar de frequente e corriqueiro, pode acarretar em graves impactos ao meio ambiente e à sociedade local, como na poluição do ar e da água, em desmatamentos e mudanças climáticas e, inclusive, em trágicos desastres envolvendo o colapso de barragens de resíduos (KOLALA; UMAR, 2019).

Diante disso, o demasiado volume de resíduos gerados pelas atividades mineradoras, assim como as diversas implicações envolvendo a disposição desses materiais, indicam a necessidade de uma melhor gestão dos resíduos de mineração. Uma estratégia

defendida por muitos autores (GEDAM *et al.*, 2021; GUREVICH; KALINKINA; KALINKIN, 2020; MENDES *et al.*, 2020b; SONG; ZHANG, 2018) consiste na valorização do resíduo de mineração por meio da sua utilização como matéria-prima alternativa para o desenvolvimento de novos materiais. Com isso, tem-se a possibilidade de valorização do resíduo proveniente do beneficiamento da nefelina sienito por meio da sua utilização como agregado no desenvolvimento de argamassas.

Adicionalmente, diversos estudos relatam a importância da valorização de resíduos de mineração em substituição parcial e/ou total do agregado miúdo natural para o desenvolvimento de argamassas por: resíduo de granito (AZEVEDO *et al.*, 2019), resíduo de quartzito (BARROS *et al.*, 2016), resíduo de scheelita (MEDEIROS *et al.*, 2019), quartzito friável (SANTOS, 2015), resíduo de minério de ferro (FONTES *et al.*, 2016; MENDES *et al.*, 2020b), entre outros.

O resíduo da nefelina sienito, apesar de descartado e considerado sem valor técnico ou econômico, foi julgado por Gurevich, Kalinkina e Kalinkin (2020) como uma reserva de componentes valiosos e com grandes possibilidades de torná-lo matéria-prima para o desenvolvimento de novos materiais. Desta forma, o resíduo da nefelina sienito foi o objeto de estudo desta pesquisa, que buscou a sua valorização e utilização dentro do setor da construção civil, mais especificamente como agregado miúdo para o desenvolvimento de argamassas de assentamento, a fim de contribuir para a redução da quantidade de resíduo disposta no meio ambiente e, conseqüentemente, reduzir a demanda de um recurso natural e finito.

3 MATERIAIS

3.1 AGREGADOS

O agregado miúdo natural, denominado nesta pesquisa de AMN, é proveniente de leito de rio da região sul de Santa Catarina (SC), sendo comercializado como areia média lavada e foi obtido em um material de construção da cidade de Criciúma/SC. O resíduo da nefelina sienito, denominado nesta pesquisa de RNS, por sua vez, é proveniente do beneficiamento da rocha nefelina sienito, explorada por uma mineradora da região sul de Santa Catarina.

Ambos os materiais utilizados como agregados para o desenvolvimento das argamassas, foram coletados e preparados de acordo com as instruções descritas na NBR 10007 (ABNT, 2004) e NBR 16915 (ABNT, 2021a). As amostragens foram realizadas em pontos aleatórios da pilha em forma de tronco cone, seguida da homogeneização em betoneira de 400 L e, por fim, o quarteamento dos materiais. Posteriormente, as amostras foram secas em uma estufa, Solab, modelo SL-100, a uma temperatura de 100 °C durante 24 h e armazenadas em bombonas herméticas identificadas.

3.2 AGLOMERANTES

O cimento Portland (CP) utilizado para o desenvolvimento das argamassas foi o tipo CP II-F-32, da marca Cimentos Cauê, escolhido devido ao seu maior teor de clínquer e por ser um dos tipos mais indicados para o desenvolvimento de argamassas de assentamento. A cal hidratada utilizada foi a tipo CH-I, da marca Serro Branco, escolhida devido ao seu alto grau de pureza, quando comparada aos outros tipos. Ambos os materiais foram obtidos em lojas de materiais de construção da cidade de Criciúma/SC.

Os dados referentes as propriedades físicas e químicas do cimento Portland e da cal hidratada foram extraídos do boletim técnico fornecido pelos fabricantes e estão expostas na Tabela 1, bem como, os respectivos parâmetros exigidos para o cimento, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018) e para a cal, segundo a NBR 7175 (ABNT, 2003).

Tabela 1 – Propriedades físicas e químicas dos aglomerantes.

Propriedade	Unidade	Valor médio		Parâmetro ABNT		
		CP II-F-32	CH-I	CP II-F-32	CH-I	
Resistência à compressão	7 dias	MPa	25,30	-	$\geq 20,00$	-
	28 dias		38,80	-	$\geq 32,00$	-
Tempos de pega	Início	min	214	-	≥ 60	-
	Fim		276	-	≤ 600	-
Finura	Blaine	cm ² /g	4278	-	-	-
	#200	%	-	10,00	-	$\leq 10,00$
Massa específica (massa/volume sólidos)		g/cm ³	3,04	2,57	-	-
Massa unitária (massa/volume+vazios)		g/cm ³	1,13	0,57	-	-
CaO		%	60,06	42,00	-	-
MgO		%	-	28,00	-	-
SO ₃		%	2,81	-	$\leq 4,50$	-
Fe ₂ O ₃		%	4,66	-	-	-
ZnO		%	0,08	-	-	-
Al ₂ O ₃		%	4,93	-	-	-
SiO ₂		%	11,89	1,72	-	-
CO ₂		%	-	4,18	$\leq 11,50$	$\leq 7,00$
SrO		%	0,92	-	-	-
Perda ao fogo (P.F.)		%	14,65	24,10	$\leq 12,50$	-

Fonte: Adaptado do boletim técnico fornecido pelos fabricantes (2024).

3.3 ÁGUA

A água utilizada é proveniente da rede pública de Criciúma/SC, com tratamento realizado por concessionária e se apresenta dentro dos padrões de potabilidade. A água foi mantida no laboratório por, pelo menos, 12 h antes do desenvolvimento das argamassas.

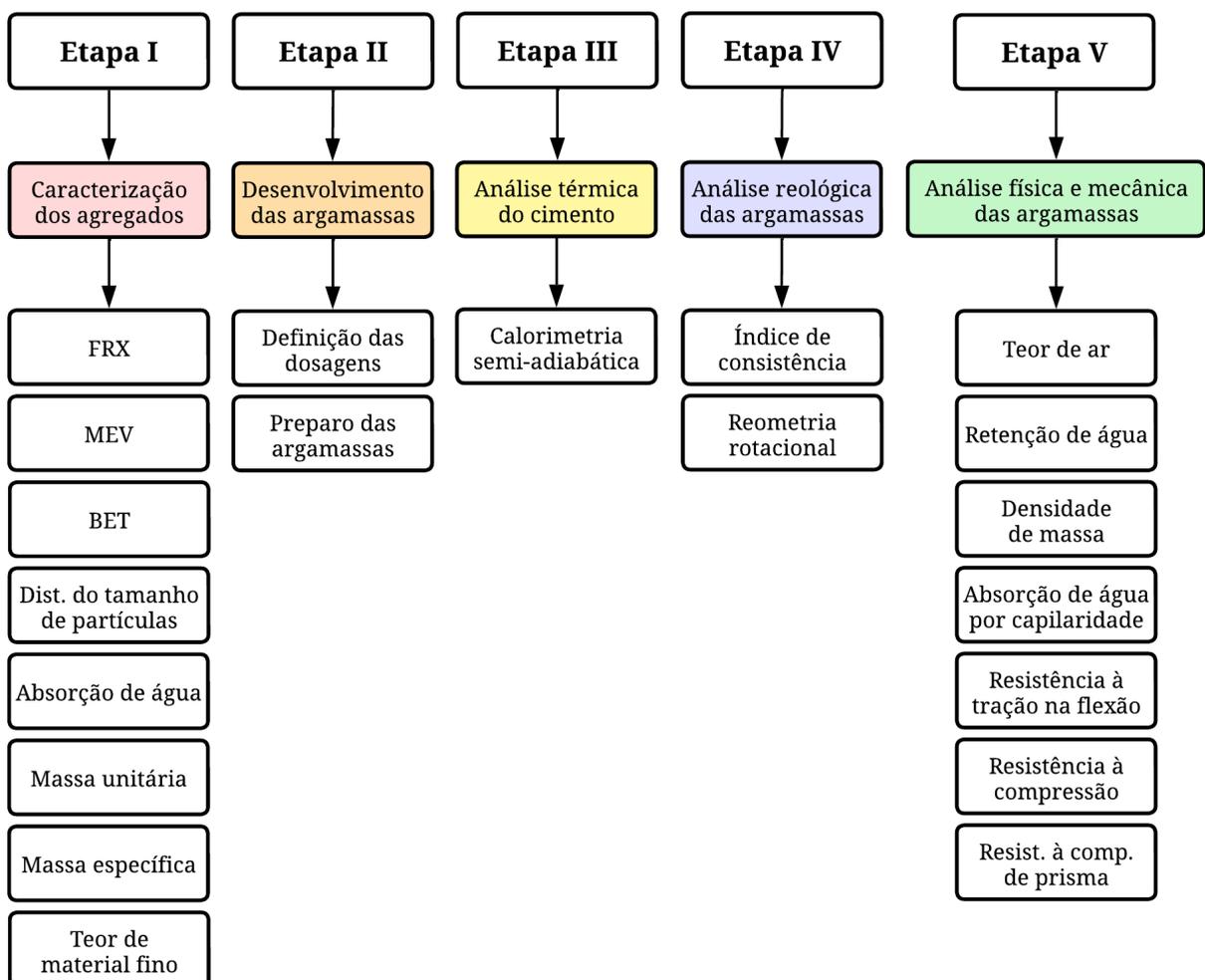
3.4 BLOCOS CERÂMICOS

Os blocos cerâmicos de vedação utilizados para o ensaio de determinação da resistência à compressão, tanto dos blocos quanto dos prismas, são provenientes de uma cerâmica localizada na cidade de Içara/SC. Os blocos possuem seis furos, dimensões de 9 cm x 14 cm x 19 cm e foram secos em estufa a uma temperatura de 100 °C durante 24 h.

4 MÉTODOS

O plano experimental foi dividido em cinco etapas que podem ser visualizadas na Figura 6. Iniciou-se pela caracterização dos agregados, abrangendo as análises química (FRX), morfológica (MEV) e física (BET, tamanho de partículas, absorção de água, massa unitária, massa específica e teor de material fino), seguidos pelo desenvolvimento das argamassas, que inclui a definição e a preparação das dosagens. Em seguida, foi realizada a análise térmica do cimento por calorimetria semi-adiabática. Por fim, foi realizada a análise reológica (índice de consistência e reometria rotacional), assim como, a análise física (teor de ar, retenção de água, densidade de massa nos estados fresco e endurecido e absorção de água por capilaridade) e a análise mecânica (tração na flexão e compressão) das argamassas desenvolvidas.

Figura 6 – Detalhamento das diferentes etapas do plano experimental adotado.



Fonte: Autora (2024).

4.1 ETAPA I – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

A Etapa I compreende a caracterização do agregado miúdo natural (AMN) e do resíduo da nefelina sienito (RNS) utilizados como agregados para o desenvolvimento das argamassas. Essa etapa foi dividida em quatro análises, sendo elas: a análise química, que abrange o ensaio de fluorescência de raios X (FRX); a análise morfológica, que engloba o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV); e a análise física, compreende os ensaios de área de superfície específica (BET), distribuição do tamanho de partículas, absorção de água, massa unitária, massa específica e teor de material fino passante pela peneira de 75 μm por lavagem.

4.1.1 Análise química

A análise química dos agregados foi feita por meio do ensaio de fluorescência de raios X (FRX), realizado em um espectrômetro de fluorescência de raios X, da marca Shimadzu, modelo EDX-7000, pelo método semiquantitativo de óxidos para amostras sólidas em pó. O ensaio foi realizado pelo Instituto de Tecnologia em Cerâmica, do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI, em Criciúma/SC.

4.1.2 Análise morfológica

A análise morfológica dos agregados foi realizada por meio do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV Zeiss EVO10). Com o intuito de melhorar condutibilidade das amostras e obter imagens de melhor qualidade, foi realizado o recobrimento das amostras com ouro, em um equipamento da marca Quorum, modelo Q156R-ES.

Para este ensaio, as amostras foram previamente peneiradas, sendo utilizadas apenas as partículas passantes na peneira de 300 μm e retidas na peneira de 150 μm e, após, o peneiramento, foram lavadas em água corrente para retirada do pó e secas em estufa a uma temperatura de 100 °C durante 24 h. Esse procedimento foi adotado a fim de melhor observar a forma e o aspecto da superfície das partículas. O ensaio de MEV foi realizado no Laboratório de Cerâmica Técnica – CerTec/IDT/UNESC.

4.1.3 Análise física

A análise física dos agregados compreende o ensaio de determinação da área de superfície específica, a partir de isotermas de adsorção de gás nitrogênio a uma temperatura de $-195,85\text{ }^{\circ}\text{C}$. A análise da área de superfície foi determinada de acordo com o modelo proposto pelo método de Brunauer, Emmet e Teller (BET), sendo utilizado um analisador de área de superfície, da marca Quantachrome Instruments, modelo Nova 1200e, localizado no Laboratório de Valorização de Resíduos – LabValora/IDT/UNESC. Antes da realização do ensaio, as amostras foram previamente cominuídas até se obter um material passante na peneira de $45\text{ }\mu\text{m}$ e tratadas por um procedimento de desgaseificação a vácuo por 3 h a uma temperatura de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, a fim de remover possíveis impurezas adsorvidas na amostra.

A distribuição do tamanho de partículas dos agregados foi realizada com o intuito de obter a curva da composição do tamanho de partículas, a dimensão máxima característica (DMC), que corresponde a abertura de malha da menor peneira, na qual a quantidade retida acumulada seja $\leq 5\%$ em massa, bem como, o módulo de finura (MF), que se refere a soma das quantidades retidas acumuladas nas peneiras da série normal, dividida por 100. Primeiramente, foi realizada a agitação mecânica por 5 min em uma amostra de 500 g de cada material e, posteriormente, calculada a quantidade retida acumulada em cada peneira, de acordo com as prescrições da NBR 17054 (ABNT, 2022b).

Para a determinação da absorção de água, as amostras foram ensaiadas na condição de saturada de superfície seca (sss), cuja condição corresponde ao estado físico em que os poros permeáveis estão preenchidos com água, sem que haja umidade superficial livre. Uma massa de 500 g dos agregados na condição de sss, foram mantidos em estufa a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 h. Após este período, as amostras foram esfriadas à temperatura ambiente e pesadas para determinar a absorção de água, conforme equação apresentada na NBR 16916 (ABNT, 2021b).

A massa unitária no estado compactado foi obtida seguindo os procedimentos do método A da NBR 16972 (ABNT, 2021c). Um recipiente com aproximadamente 15 L foi preenchido com três camadas aproximadamente iguais e cada camada foi adensada com 25 golpes, por uma haste padrão de compactação, distribuídos uniformemente em toda a superfície. A massa da amostra contida no recipiente foi determinada e correlacionando-a com o volume ocupado. Já no estado solto, seguindo os procedimentos do método C, o mesmo recipiente foi preenchido, despejando o agregado a uma altura de queda constante de, aproximadamente, 15 cm. A superfície do recipiente foi regularizada com o auxílio de uma régua metálica, sendo a massa da amostra contida no recipiente determinada, correlacionando-a como volume ocupado.

Para a determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem (teor de material fino), amostras foram depositadas sob uma peneira de malha de 75 µm e lavadas em água corrente até que a água da lavagem apresentasse limpidez e transparência similares a uma amostra contendo apenas água. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 100 °C por 24 h, pesadas e determinado o teor de material fino, conforme equação apresentada na NBR 16973 (ABNT, 2021d).

Para a determinação da massa específica, amostras de 500 g de ambos os agregados na condição de sss foram colocadas em um picnômetro, completando o recipiente com água até uma marca previamente aferida, correlacionando a massa e o volume ocupados pelo agregado para determinar este parâmetro, conforme procedimentos apresentados na NBR 16916 (ABNT, 2021b).

4.2 ETAPA II – DESENVOLVIMENTO DAS ARGAMASSAS

A Etapa II compreende o desenvolvimento das argamassas, que iniciou com a definição das dosagens e também a preparação das argamassas.

4.2.1 Definição das dosagens

A dosagem dos insumos necessários para o desenvolvimento de uma argamassa de assentamento (cimento, cal, agregado miúdo e água), tem como objetivo obter a melhor proporção entre os constituintes, de forma a adquirir as propriedades desejadas no estado fresco e no endurecido. O traço comumente utilizado nos canteiros de obra, e também adotado nesta pesquisa, foi o de 1:2:9 (cimento:cal:agregado miúdo), em volume. Para o desenvolvimento das argamassas, foi realizada a conversão do traço em volume para o traço em massa, a fim de possuir um controle mais rigoroso das quantidades dos constituintes e, conseqüentemente, reduzir variabilidades nos resultados.

Foram adotadas cinco dosagens para as argamassas, com diferentes teores de substituição do agregado miúdo natural (AMN) pelo resíduo da nefelina sienito (RNS), de modo a analisar o comportamento reológico e mecânico em proporções distintas de substituição. A dosagem de referência, desenvolvida com 100 % de AMN e 0 % de RNS, denominada D0; a dosagem desenvolvida com 75 % de AMN e 25 % de RNS, denominada D25; a dosagem desenvolvida com 50 % de AMN e 50 % de RNS denominada D50; a dosagem desenvolvida com 25 % de AMN e 75 % de RNS, denominada D75; por fim, a dosagem desenvolvida com

0 % de AMN e 100 % de RNS denominada D100. Na Tabela 2 estão apresentadas as dosagens das argamassas em volume, suas respectivas porcentagens de RNS e nomenclaturas.

Tabela 2 – Dosagens das argamassas desenvolvidas, em volume.

Nomenclaturas	% de RNS	Cimento	Cal	AMN	RNS	Água
D0	0 %	1,00	2,00	9,00	0,00	4,80
D25	25 %	1,00	2,00	6,75	2,25	4,80
D50	50 %	1,00	2,00	4,50	4,50	4,80
D75	75 %	1,00	2,00	2,25	6,75	4,80
D100	100 %	1,00	2,00	0,00	9,00	4,80

Fonte: Autora (2024).

No que se refere à quantidade de água das dosagens, no intuito de comparar igualmente a demanda de água de cada uma das composições, manteve-se fixa a relação a/a para todas as argamassas. Para tal, foram realizados testes preliminares de índice de consistência para a dosagem de referência (D0) com o propósito de obter a relação a/a para a consistência de (260 ± 5) mm, indicado pela NBR 13276 (ABNT, 2016a) como um ponto de partida para o desenvolvimento de argamassas.

Todavia, a relação a/a encontrada impossibilitou a realização do ensaio de reometria rotacional com a argamassa com 100% de resíduo (D100), sendo necessário a realização de novos testes consistência, chegando-se a uma relação a/a de 1,6, que possibilitou a realização do ensaio de reometria para todas as dosagens.

4.2.2 Preparo das argamassas

Todos os ensaios foram realizados em condições laboratoriais com a temperatura controlada em (23 ± 2) °C. Além disso, os materiais e os equipamentos permaneceram no laboratório por pelo menos 12 h antes do início dos ensaios, conforme recomendações da NBR 13276 (ABNT, 2016a). Os agregados foram previamente secos em estufa a 100 °C por 24 h e, por este motivo, não houve necessidade de determinar a umidade dos materiais para corrigir o consumo de água no traço.

O preparo das argamassas para a caracterização física e mecânica iniciou-se com a pesagem de todos os constituintes, de modo que os materiais secos (cimento, cal e agregados) somassem 2,5 kg (quantidade suficiente para a realização do ensaio e para uma adequada homogeneização dos materiais no recipiente). Após a pesagem dos materiais, com o auxílio de

uma argamassadeira, Pavitest, modelo I-3010, utilizada na velocidade baixa, foi iniciado o procedimento de mistura (Quadro 2).

Já para o preparo das argamassas para o ensaio de reometria rotacional, foram pesados 500 g de materiais secos. Após a pesagem dos materiais, com o auxílio de uma batedeira planetária, KitchenAid, modelo KEA30, na velocidade 4 (velocidade em que a rotação se aproxima da rotação da velocidade baixa da argamassadeira utilizada), foi iniciada a homogeneização dos insumos. O procedimento de mistura utilizado para ambos os preparos foi adaptado da NBR 16541 (ABNT, 2016b) e a sequência pode ser visualizada no Quadro 2.

Quadro 2 – Procedimento de mistura dos insumos para a preparação das argamassas.

Tempo	Velocidade	Procedimento
0 s	Desligada	Adição da água e dos agregados
0 - 60 s	Baixa	Mistura dos materiais
60 - 90 s	Desligada	Adição dos aglomerantes
90 - 150 s	Baixa	Mistura dos materiais
150 - 180 s	Desligada	Raspagem do material aderido ao recipiente
180 - 210 s	Baixa	Mistura dos materiais

Fonte: Autora (2024).

Para a realização dos ensaios no estado fresco, após a homogeneização dos constituintes as argamassas foram mantidas em repouso (período de indução explicado no item a seguir) em recipientes cobertos por plástico filme, a fim de evitar a perda de água. Passado esse período, as argamassas foram misturadas com uma espátula de silicone por 30 s, a fim de incorporar a água que ascendeu para a superfície. Os corpos de prova para os ensaios no estado endurecido, por sua vez, foram moldados logo após a homogeneização dos constituintes.

4.3 ETAPA III – ANÁLISE TÉRMICA DO CIMENTO

A Etapa III compreende a análise térmica realizada para a determinação do tempo correspondente ao período de indução, ou de dormência, dos mecanismos de hidratação do cimento utilizado. Sabe-se que as reações de hidratação iniciam no momento de contato da água com o cimento, liberando grande quantidade de calor, seguido de um período de dormência. Esse calor inicialmente liberado pode alterar a viscosidade das pastas e interferir nas análises do estado fresco das argamassas.

Neste sentido, foi realizado o ensaio de análise térmica do cimento com o auxílio de um equipamento de análise calorimétrica semi-adiabática desenvolvido por Müller (2023).

Foram obtidas leituras do calor de hidratação a cada minuto para quatro amostras distintas: duas pastas, sendo uma de cimento e água; e outra de cimento, cal e água; e duas argamassas, sendo a D0, desenvolvida sem RNS e a D100, desenvolvida integralmente com RNS. Estas quatro amostras foram escolhidas com o intuito de verificar o comportamento do período de indução do cimento quando utilizado em diferentes composições cimentícias.

A preparação das argamassas, bem como das pastas foi realizada conforme descrito na Etapa II. Para ambas as pastas, a relação água/cimento utilizada foi de 0,5. Além disso, para este ensaio, utilizou-se um volume de material de 800 mL para as argamassas e de 300 mL para as pastas, de acordo com a capacidade dos reservatórios do equipamento.

Para a realização do ensaio, as amostras foram acondicionadas nos compartimentos do equipamento e confinadas por 65 h em uma sala climatizada com a temperatura controlada em (23 ± 2) °C durante toda a duração do ensaio. Ao final desse período, foram extraídos os dados por meio do *software HOBOWare*, que possibilitou a geração das curvas de temperatura em função do tempo para a obtenção do período de indução das amostras.

4.4 ETAPA IV – ANÁLISE REOLÓGICA DAS ARGAMASSAS

A Etapa IV compreende o estudo do comportamento reológico das argamassas, sendo as amostras ensaiadas após o período de indução. Primeiramente, foi realizado o ensaio de índice de consistência e, após, o ensaio de reometria rotacional, conforme descrição a seguir.

4.4.1 Índice de consistência

Para a determinação do índice de consistência das argamassas, a princípio, foram umedecidos com água o tampo da mesa e as paredes do molde, a fim de reduzir o atrito e uniformizar a influência deste parâmetro. Após, a argamassa foi moldada em três camadas sucessivas com alturas iguais no molde e foram aplicados em cada uma delas, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com o soquete, distribuindo-os uniformemente na argamassa. Posteriormente aos últimos 5 golpes, foi realizado o rasamento da argamassa para retirar o excesso de material. Só então foi acionada a manivela da mesa, de maneira que a mesa subisse e caísse uniformemente 30 vezes em um período de 30 s. Por fim foi medido, com um paquímetro, o espalhamento em três pontos uniformes ao longo do perímetro da argamassa. O índice de consistência corresponde à média das três medidas de diâmetro, sendo o ensaio realizado de acordo com as instruções da NBR 13276 (ABNT, 2016a).

4.4.2 Reometria rotacional

Foi realizado o ensaio de reometria rotacional em um reômetro rotacional, *Thermo Fisher Scientific*, modelo *HAAKE MARS iQ*, localizado no Laboratório de Cerâmica Técnica – CerTec/IDT/UNESC, que possui um intervalo de rotação de 0,01 a 2000 rpm, resolução de torque de 2 μNm e resolução de ângulo de 0,63 μ . Foi utilizado o *spindle Vane*, *Thermo Fisher Scientific*, modelo Rotor Vane FL22 4B/SS, com quatro pás, altura de 16 mm e diâmetro de 22 mm. Foi utilizado como recipiente um béquer de vidro com capacidade de 150 mL, com altura interna (até a marca aferida em 150 mL) de 59 mm e diâmetro interno de 55 mm para a medição da amostra. Na Figura 7 são apresentados o sistema geométrico de medição.

Figura 7 – Reômetro e *spindle* utilizados no ensaio de reometria rotacional: (a) Reômetro *HAAKE MARS iQ*; (b) *Spindle Vane*.



(a)



(b)

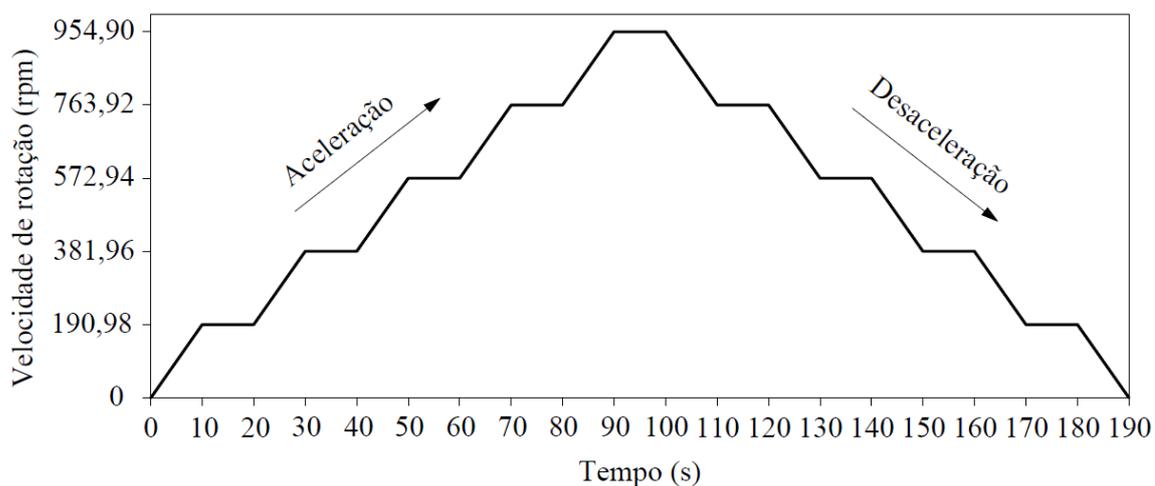
Fonte: Autora (2024).

Devido à ausência de normas técnicas que descrevam os procedimentos para o ensaio de reometria rotacional e por ser difícil a comparação com os estudos já realizados (em razão da diferença de equipamentos, bem como, da finalidade das pesquisas), o procedimento experimental para o ensaio de reometria foi realizado com base na velocidade de rotação de uma argamassadeira padrão. Com isso foi possível analisar o comportamento reológico das argamassas na taxa em que são impostas no momento da mistura. Sendo assim, a partir das informações apresentadas na NBR 7215 (ABNT, 2019), como o raio do recipiente, o raio da hélice e a rotação em torno do eixo, foi realizado o cálculo da velocidade de rotação do equipamento, resultando em um valor de 190,98 rpm.

Ressalta-se que o tamanho de partículas dos agregados utilizados em materiais cimentícios limita sua caracterização reológica, por conta da dificuldade de estabelecer uma condição métrica de determinação real da taxa de cisalhamento no sistema de medição. Sendo assim, o comportamento tipicamente plástico Binghamiano destes materiais pode ser descrito por curvas de fluxo construídas a partir de medidas de variação do torque (Nm) e da velocidade de rotação (rpm), permitindo a extração de coeficientes proporcionais à tensão de cisalhamento (Pa), à taxa de cisalhamento (s^{-1}) e à viscosidade (Pa.s).

Desta forma, no procedimento experimental de aceleração (ida), a variação da velocidade de rotação foi de 0 rpm a 954,90 rpm (correspondente a taxa de cisalhamento de $0 s^{-1}$ a $100 s^{-1}$) e, logo após, na etapa de desaceleração (volta), a variação da velocidade de rotação foi de 954,90 rpm a 0 rpm (correspondente a taxa de cisalhamento de $100 s^{-1}$ a $0 s^{-1}$). Este intervalo foi adotado para ser possível a obtenção de um perfil reológico das argamassas, sendo o procedimento experimental adaptado de Giordani (2017). A velocidade de rotação de interesse foi de 190,98 rpm (correspondente a taxa de cisalhamento de $20 s^{-1}$), na etapa de aceleração. Os patamares evoluíram de 190,98 rpm em 190,98 rpm com tempo de estabilização de 10 s para cada patamar, totalizando 190 s de ensaio. O procedimento experimental, com a velocidade de rotação aplicada em função do tempo, pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8 – Representação do procedimento experimental utilizado no ensaio de reometria.

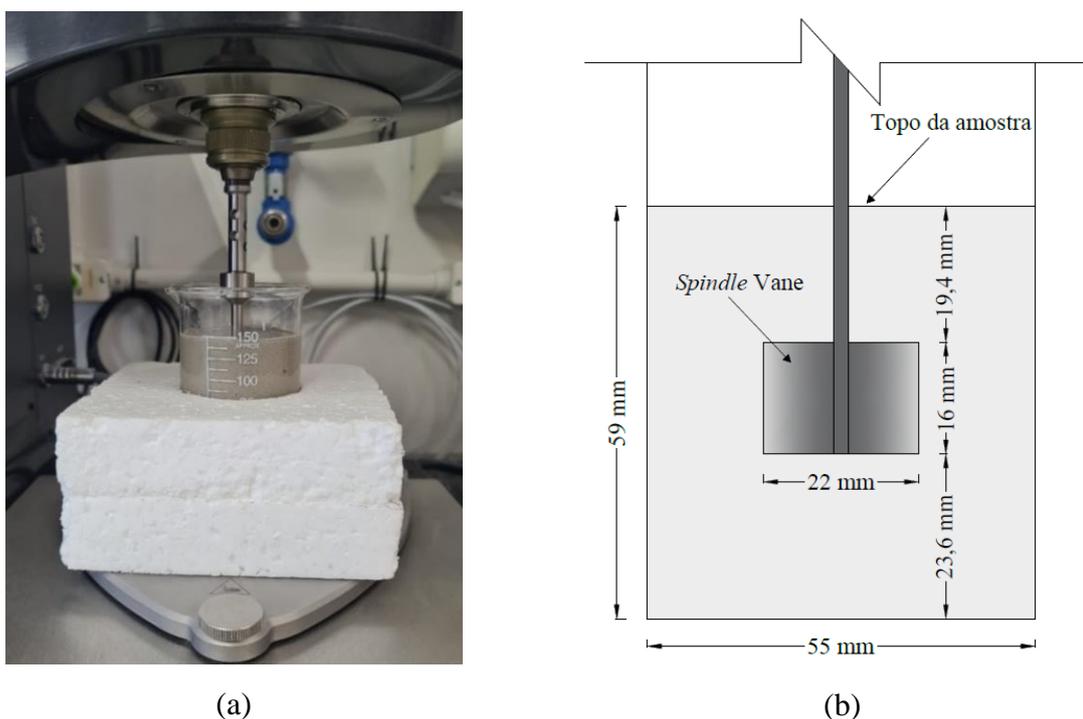


Fonte: Autora (2024).

Após o período de indução das argamassas, 150 mL da amostra foi adensada no béquer com 10 golpes com uma espátula na posição vertical. Para garantir o posicionamento perfeitamente centralizado do *spindle* Vane com o béquer, foi desenvolvido um aparato de poliestireno expandido que possui um encaixe em sua parte inferior, mantendo o conjunto centralizado com o equipamento durante todo o ensaio (Figura 9a). Posteriormente, o *spindle*

foi inserido na argamassa até o *gap* (distância entre a base do recipiente e o *spindle*) de 23,6 mm (valor referente a 10 vezes a dimensão máxima da maior partícula do agregado utilizado), ficando a marcação em sua haste submersa na amostra. Na Figura 9b representa-se, de forma esquemática, o posicionamento do sistema.

Figura 9 – Posicionamento do recipiente e do *spindle* Vane: (a) recipiente com argamassa posicionado de forma centralizada no reômetro; (b) representação esquemática do posicionamento do *spindle* Vane no recipiente.



Fonte: Autora (2024).

4.5 ETAPA V – ANÁLISE FÍSICA E MECÂNICA DAS ARGAMASSAS

A etapa V compreende o estudo do comportamento físico e mecânico das argamassas e se iniciou pelos ensaios no estado fresco. Passado o período de indução das argamassas, foram realizados os ensaios de densidade de massa, retenção de água e teor de ar.

Para os ensaios no estado endurecido, após o preparo das argamassas, foram moldados os corpos de prova de acordo com as instruções da NBR 13279 (ABNT, 2005c). Antes da moldagem, foi aplicada uma fina camada de óleo mineral nas faces internas dos moldes metálicos prismáticos, com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm. As argamassas recém-preparadas foram introduzidas nos moldes em duas camadas com alturas aproximadamente iguais. Na primeira camada, foram aplicados 15 golpes com uma espátula na posição vertical e

na segunda camada, foram aplicadas 15 quedas na mesa de consistência. Os corpos de prova foram rasados, revestidos com plástico filme de modo a conservar a umidade e mantidos pelo período de 7 dias em cura ao ar em uma estufa com a temperatura controlada em (23 ± 2) °C.

Após este período, os corpos de prova de argamassa foram desmoldados e mantidos em estufa com a temperatura controlada em (23 ± 2) °C durante o período de 28 dias. As argamassas foram caracterizadas pelos ensaios de densidade de massa, absorção de água por capilaridade, resistência à tração na flexão e à compressão. A seguir, estão descritos os procedimentos para a realização dos ensaios físicos e mecânicos das argamassas desenvolvidas, tanto em seu estado fresco, quanto em seu estado endurecido após os 28 dias de cura ao ar.

4.5.1 Teor de ar

O teor de ar foi determinado pelo método pressométrico, de acordo com a NBR 16887 (ABNT, 2020). Para isso, foi utilizado um equipamento da marca Contenco, composto por um recipiente cilíndrico metálico de 1 L com fechamento completo, possuindo tampa composta de válvulas de ar e chaves para admissão de ar e água e manômetro para medição de pressão. Foram introduzidas no recipiente três camadas de argamassa com alturas aproximadamente iguais e, em cada camada, 25 golpes foram aplicados com o auxílio de uma espátula na posição vertical. O recipiente foi rasado e fechado hermeticamente com a tampa. Foi fechada a válvula de entrada de ar principal e abertas as chaves para admissão de água no sistema, até que a água introduzida em uma das chaves saísse pela chave oposta, a fim de expulsar o ar contido no interior do sistema. Foi fechada a válvula de sangramento de ar e introduzido ar no sistema, com o auxílio de uma bomba, até que o manômetro estivesse na linha de pressão inicial (zero). Após esses procedimentos, foi aberta a válvula de ar principal e feita a leitura do teor de ar no manômetro.

4.5.2 Retenção de água

A retenção de água foi determinada com o auxílio de um funil de Büchner modificado, da marca Solotest e uma bomba de vácuo para aplicar sucção nas argamassas, conforme orientações da NBR 13277 (ABNT, 2005a). Inicialmente, foi colocado o prato sobre o funil, garantindo a estanqueidade entre eles e umedecido um papel filtro posicionando-o sobre o fundo do prato. Foi acionada a bomba de vácuo aplicando ao conjunto uma sucção de 51 mm de mercúrio, a fim de retirar o excesso de água do papel filtro por 90 s. O prato e o papel filtro

úmido foram pesados; em seguida, o prato foi preenchido com argamassa e realizado o adensamento com 37 golpes de soquete (16 junto à borda e 21 distribuídos no centro da amostra). Foi retirado o excesso de material e pesado o sistema (prato, papel úmido e argamassa). Por fim, foi acionada a bomba de vácuo, aplicando novamente ao sistema uma sucção de 51 mm de mercúrio, durante 15 min. Após este período, o sistema foi pesado e a retenção de água das argamassas foi calculada por meio da equação apresentada em norma, correlacionando a massa da argamassa antes e depois da sucção.

4.5.3 Densidade de massa no estado fresco

A densidade de massa no estado fresco das argamassas foi realizada segundo a NBR 13278 (ABNT, 2005b). Após a calibração do recipiente metálico cilíndrico, com volume de, aproximadamente, 400 L, foram introduzidas porções de argamassa em três camadas com alturas aproximadamente iguais. Em cada camada, foram aplicados 20 golpes com o auxílio de uma espátula na posição vertical. Posteriormente, foram efetuadas três quedas do recipiente em uma altura de, aproximadamente, 3 cm. O recipiente foi rasado e pesado o conjunto, sendo a densidade de massa calculada pela divisão entre a massa de argamassa e o volume do recipiente.

4.5.4 Densidade de massa no estado endurecido

A determinação da densidade de massa no estado endurecido das argamassas foi realizada de acordo com as instruções da NBR 13280 (ABNT, 2005d). Aos 28 dias de cura, os corpos de prova moldados foram pesados e tiveram suas dimensões avaliadas para determinação do volume, medindo a altura, a largura e o comprimento, em duas posições distintas. Determinou-se a densidade de massa no estado endurecido a partir da relação entre a massa e o volume dos corpos de prova.

4.5.5 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade das argamassas foi realizada seguindo as instruções da NBR 15259 (ABNT, 2005e). Com o auxílio de uma lixa grossa (grão 80), foi aumentada a rugosidade de uma face quadrada do corpo de prova e, posteriormente, limpa com um pincel seco para remoção das partículas soltas. Em seguida, os corpos de prova foram pesados e posicionados com a face lixada sobre um suporte, de modo que o nível de água ficasse

constante em (5 ± 1) mm acima da face das argamassas em contato com a água. Após 10 min, foram pesados os corpos de prova e retornaram imediatamente ao recipiente com água até os 90 min onde foi realizada a pesagem final. Foi determinada a absorção de água por capilaridade e o coeficiente de capilaridade das argamassas por meio das equações apresentadas em norma.

4.5.6 Resistência à tração na flexão e à compressão

Para a determinação da resistência à tração na flexão das argamassas, os corpos de prova foram posicionados nos apoios do equipamento, de modo que a face rasada não ficasse em contato com os apoios, nem com o dispositivo de carga, sendo aplicada uma carga constante de (50 ± 10) N/s até a ruptura do corpo de prova. A resistência à tração foi determinada por meio da equação apresentada na NBR 13279 (ABNT, 2005c).

A resistência à compressão foi determinada seguindo as prescrições da NBR 13279 (ABNT, 2005c). Metade do corpo de prova do ensaio de flexão foi posicionado no apoio do equipamento, de modo que a face rasada não ficasse em contato com o apoio, sendo aplicada uma carga constante de (500 ± 50) N/s até a ruptura do corpo de prova. Os ensaios de resistência mecânica das argamassas foram realizados aos 28 dias de cura e utilizaram uma prensa da marca Emic, modelo DL 300, com célula de carga de 20 kN.

4.5.7 Resistência à compressão de prisma

Um prisma pode ser definido como um sistema composto pela união de dois ou mais blocos por meio de juntas horizontais de argamassa com cerca de 2 cm de espessura. Esse sistema é destinado ao ensaio de compressão, de modo a analisar o comportamento do sistema e das argamassas em uma situação que mais se aproxima a uma condição real de uma parede, isto é, quando utilizadas como juntas na união entre blocos cerâmicos de vedação sujeitos a carregamentos pelo peso próprio e por elementos estruturais (ASTM, 2023).

Considerando que não existem normas brasileiras específicas para o ensaio de resistência à compressão de prismas produzidos com blocos cerâmicos de vedação, foi elaborada uma metodologia própria, com base nas orientações da NBR 15961-2 (ABNT, 2011), norma destinada à compressão de prisma de blocos de concreto.

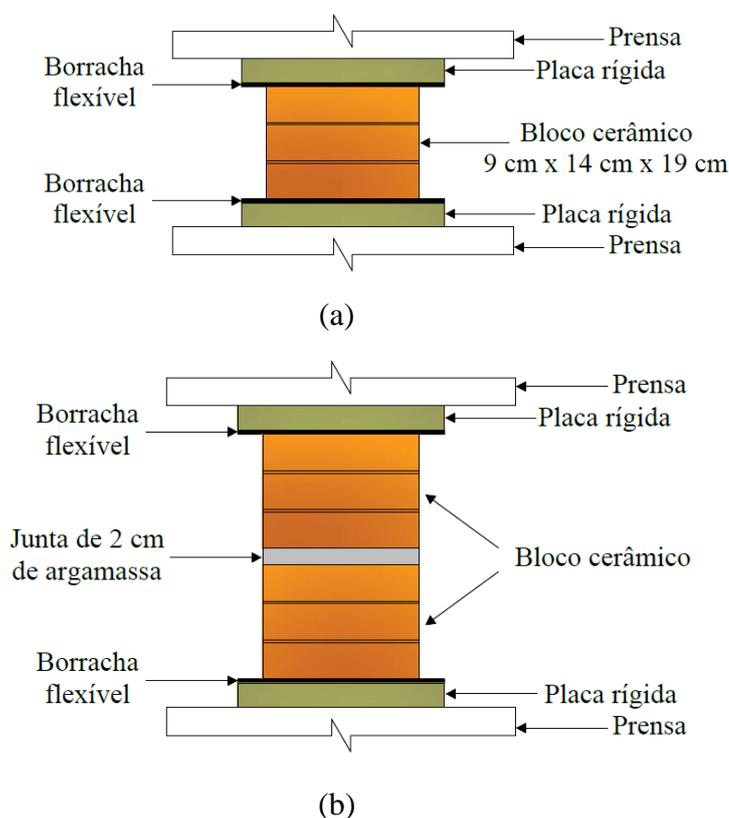
Posteriormente ao preparo das argamassas, o bloco inferior foi posicionado em uma base plana, limpa e nivelada. Com o auxílio de gabaritos de madeira, a fim de padronizar a espessura das juntas, o molde foi preenchido com argamassa até a espessura de 2 cm, apoiando

o segundo bloco sobre a junta. Foram aplicados 3 golpes sobre o prisma com um martelo de borracha. Os prismas foram mantidos em condições laboratoriais durante o período de 28 dias.

Para o ensaio de compressão dos blocos cerâmicos e dos prismas, foram utilizadas placas rígidas, planas e indeformáveis, posicionadas na parte superior e na parte inferior dos blocos e dos prismas, de modo a transmitir igualmente a carga aplicado pelo equipamento pela área dos blocos. Adicionalmente, uma borracha flexível foi posicionada entre a placa e o bloco, a fim de acomodar melhor as tensões iniciais durante o ensaio. Na Figura 10 está representada de forma esquemática o posicionamento do prisma e do bloco cerâmico no equipamento.

Figura 10 – Representação esquemática do posicionamento das amostras na prensa:

(a) posicionamento do bloco cerâmico; (b) posicionamento do prisma.



Fonte: Autora (2024).

Primeiramente, foi realizado o ensaio de resistência à compressão dos blocos cerâmicos, seguindo as instruções da NBR 15270-3 (ABNT, 2005g). Cada amostra foi acomodada na prensa de modo que o seu centro de gravidade estivesse no eixo de carga do equipamento e foi então aplicada uma tensão de $(0,05 \pm 0,01)$ MPa/s até a ruptura do bloco cerâmico. Foi determinado a resistência à compressão de seis amostras.

Após a cura ao ar de 28 dias, foi realizado o ensaio de determinação da resistência à compressão dos prismas, onde cada prisma também foi acomodado na prensa de modo que o

seu centro de gravidade estivesse no eixo de carga do equipamento e foi então aplicada uma tensão de $(0,05 \pm 0,01)$ MPa/s até a ruptura do mesmo. Os ensaios de resistência mecânica à compressão dos blocos e dos prismas foram realizados aos 28 dias e utilizaram uma prensa da marca Emic, modelo DL 300, com célula de carga de 300 kN.

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

No que se refere à caracterização dos agregados, os resultados dos ensaios da análise química, morfológica e o ensaio de BET, foram obtidos por meio de um ensaio único. Já os resultados do ensaio da análise física, foram obtidos por meio de três ensaios consecutivos para cada material e apresentado o valor médio das três repetições.

Em relação aos ensaios de caracterização das argamassas, os resultados do ensaio de índice de consistência e densidade de massa no estado fresco foram obtidos por meio de três ensaios consecutivos para cada dosagem. Os resultados do ensaio de reometria rotacional, por sua vez, foram obtidos por meio de dois ensaios consecutivos. Os resultados do ensaio de retenção de água e teor de ar foram obtidos por meio de um ensaio único, resultando em um valor individual para cada dosagem. Por fim, os resultados do ensaio de densidade de massa no estado endurecido, absorção de água por capilaridade, resistência à tração na flexão, resistência à compressão e resistência à compressão dos blocos cerâmicos e dos prismas, foram obtidos por meio de seis ensaios consecutivos para cada dosagem.

Para todos os ensaios realizados mais de uma vez, o valor médio das repetições foi apresentado como resultado e, quando possível, a barra de erros foi plotada no gráfico indicando a variabilidade dos dados obtidos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ETAPA I – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

5.1.1 Análise química

A identificação dos elementos químicos do AMN e do RNS, na forma de óxidos, a partir do método de espectrometria de fluorescência de raios X, é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição dos óxidos mais prováveis dos agregados.

Elementos	AMN	RNS
	Teor (%)	Teor (%)
SiO ₂	92,32	56,16
Al ₂ O ₃	4,20	20,46
K ₂ O	2,29	4,68
Na ₂ O	0,30	10,35
CaO	0,05	1,15
Fe ₂ O ₃	0,26	5,48
TiO ₂	0,15	0,46
Perda ao fogo	0,43	0,63
Outros	-	0,63

Fonte: Autora (2024).

O AMN é composto predominantemente por sílica (SiO₂), sendo esta responsável por, aproximadamente, 92 % de sua composição. Destaca-se, ainda, a presença de alumina (Al₂O₃) e óxido de potássio (K₂O), com teores de, aproximadamente, 4 e 2 %, respectivamente. Esses três compostos correspondem a quase 99 % da composição do material.

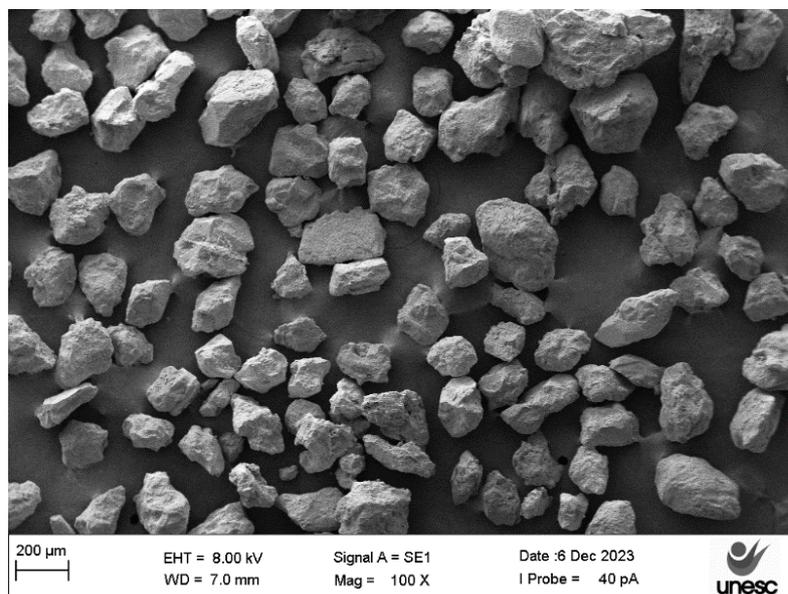
O RNS, por sua vez, caracteriza-se majoritariamente por SiO₂ e Al₂O₃, com teores aproximados de 56 e 20 %, respectivamente. Ressalta-se os teores de óxido de sódio (Na₂O) com cerca de 10 %, de óxido de ferro (Fe₂O₃) com cerca de 5 % e de óxido de potássio com cerca 5 %. Esses cinco elementos são responsáveis por mais de 97 % da composição do resíduo.

Nota-se que o AMN e o RNS são compostos majoritariamente por sílica e alumina, com concentrações superiores a 96 e 76 %, respectivamente. De acordo com Jiang *et al.* (2023), a presença de sílica e alumina em agregados é altamente desejável. Isso se deve a otimização de propriedades que estes óxidos proporcionam à matriz, como resistência mecânica, resistência à abrasão, controle de retração e adesão entre o agregado e a pasta.

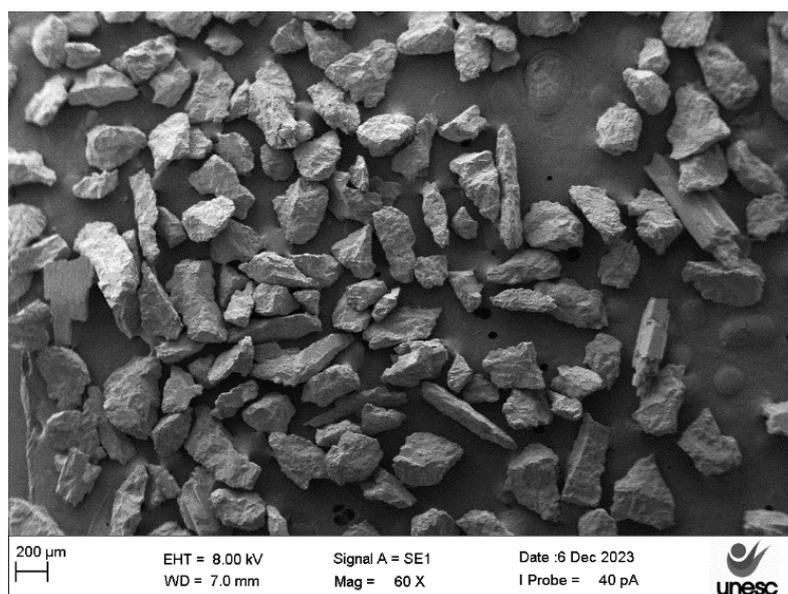
5.1.2 Análise morfológica

O ensaio de MEV foi realizado com o objetivo de analisar as características morfológicas, como a forma, a geometria e o aspecto da superfície dos agregados. Na Figura 11 podem ser visualizadas as imagens revelando a morfologia das partículas e na Figura 12 podem ser observadas as imagens exibindo o aspecto da superfície dos agregados.

Figura 11 – Imagens de MEV revelando a morfologia dos agregados: (a) morfologia do AMN; (b) morfologia do RNS.



(a)

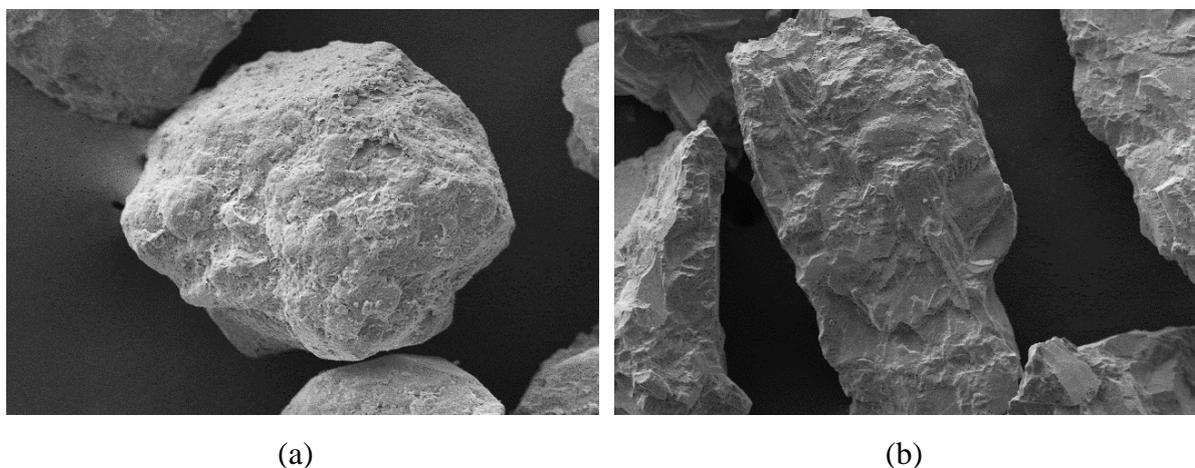


(b)

Fonte: Autora (2024).

Figura 12 – Imagens de MEV exibindo o aspecto da superfície dos agregados:

(a) superfície do AMN; (b) superfície do RNS.



Fonte: Autora (2024).

A morfologia das partículas, vastamente abordada por Barrett (1980), pode ser expressa por três propriedades independentes, sendo elas: a forma (quantificada pela esfericidade, planicidade e alongamento); a circularidade (contorno circular ou projeções com cantos e bordas); e a rugosidade (aspecto da superfície).

Deste modo, nas micrografias da Figura 11 e da Figura 12, pode-se observar que o AMN possui partículas com uma forma predominantemente arredondada a cúbica, conseqüentemente um contorno circular com poucas projeções e uma superfície lisa. O RNS, por sua vez, possui partículas com uma forma predominantemente alongadas e irregulares, com projeções com cantos e bordas e uma superfície rugosa.

Esses resultados já eram esperados, uma vez que o AMN é extraído de leito de rio e a água e o intemperismo são capazes de arredondar as partículas devido à abrasão superficial e, inclusive, tornar as superfícies mais lisas. Já o RNS é oriundo da britagem da rocha nefelina sienito e agregados britados, segundo Westerholm *et al.* (2008), normalmente apresentam uma forma mais irregular e superfície rugosa devido a britagem mecânica e ao peneiramento.

Os resultados obtidos na análise morfológica corroboram com o trabalho de Li *et al.* (2023), em que os autores relatam que o agregado miúdo proveniente de britagem se mostrou menos esférico, mais irregular e mais rugoso que o agregado miúdo natural de rio. Ahn e Fowler (2001) mencionam, também, que agregados oriundos de britagem costumam ser mais angulares e com superfície rugosa que um agregado miúdo natural extraído do leito de rios, que comumente se apresentam mais esféricos e com superfície lisa.

A morfologia do agregado miúdo, segundo He *et al.* (2022), é um dos fatores que mais afetam o desempenho de uma argamassa, sendo a análise morfológica um pré-requisito para a investigação dos efeitos desses materiais. Neste sentido, Aïssoun, Hwang e Khayat (2016) comentam que os agregados britados, em razão da sua elevada irregularidade e rugosidade, provocam o aumento do atrito interno entre as partículas, acarretando em consequências significativas no comportamento reológico das argamassas. O aumento da demanda de água e, conseqüentemente, a queda da fluidez, são os principais efeitos observados.

Apesar dos efeitos negativos na trabalhabilidade, Brito, Kurda e Silva (2018) explanam que, partículas com formatos irregulares e superfícies rugosas, como o RNS, podem intensificar a união entre a pasta e o agregado, contribuindo para uma melhor aderência e resistência mecânica, comparado às argamassas desenvolvidas com agregado natural. Além disso, Londero *et al.* (2017) afirmam que as variedades de partículas existentes, como as arredondadas e angulosas e as lisas e rugosas, devem ser combinadas de forma a ocupar o maior volume possível, a fim de reduzir o teor de vazios e, deste modo, favorecer a resistência mecânica e a durabilidade da matriz cimentícia.

Diante do exposto, acredita-se que a utilização do RNS poderá influenciar no comportamento reológico das argamassas, em razão das suas partículas irregulares e alongadas, bem como da sua superfície rugosa. Por outro lado, devido a essas características das partículas, o uso do resíduo poderá promover melhorias na resistência mecânica, em razão da intensificação da aderência entre a fração agregado e a matriz cimentícia.

5.1.3 Análise física

O ensaio para determinação da área de superfície específica das partículas dos agregados foi realizado por meio da adsorção gasosa, com o intuito de correlacionar com as propriedades físicas fundamentais dos materiais/minerais constituintes, bem como, com as propriedades das argamassas desenvolvidas. A Tabela 4 apresenta os resultados do ensaio de área de superfície específica dos agregados.

Tabela 4 – Área de superfície específica dos agregados.

AMN	RNS
2,03 m ² /g	2,41 m ² /g

Fonte: Autora (2024).

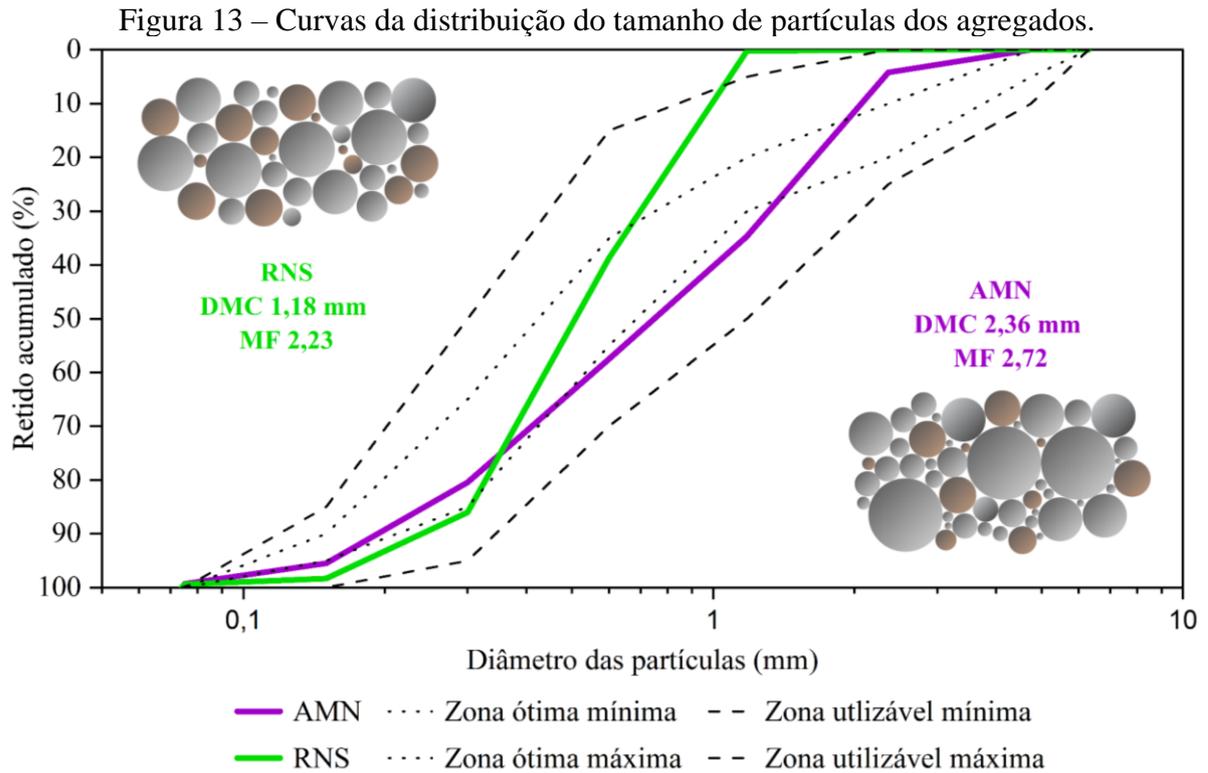
Nota-se que o AMN possui uma menor área de superfície quando comparado com o RNS, apresentando valores de 2,03 e 2,41 m²/g, respectivamente. De acordo com Dinger (2005), esse é um indicativo característico da finura do material, considerando que, quanto maior a área de superfície, menor são as partículas que compõe a amostra. Desta forma, os resultados indicam que o RNS é composto por partículas mais finas que o AMN.

A área de superfície específica é um importante parâmetro de controle para o processamento de um material, principalmente no âmbito reológico (DINGER, 2005). À vista disso, Recena (2012) explana que a demanda de água para uma dada trabalhabilidade, está sempre condicionada à área de superfície dos constituintes da argamassa. Cardoso (2009) complementa que quanto maior a área de superfície, maior é a demanda de água para cobrir as partículas, ocasionando na redução da fluidez da argamassa. Essa redução da fluidez, ou da trabalhabilidade, pode ser atribuída ao aumento do atrito interno entre as partículas, devido à menor distância existente entre elas (RANA *et al.*, 2016).

Bonavetti e Irassar (1994) avaliaram a trabalhabilidade de argamassas e concluíram que a quantidade de água necessária para manter uma trabalhabilidade constante aumenta, à medida em que se substitui o agregado miúdo natural por um material com maior área de superfície específica. Recena (2012) complementa que o uso integral de agregado fino, como o RNS, por sua maior superfície específica, gera uma argamassa que para apresentar uma determinada trabalhabilidade demanda quase 50 % a mais de água, comparada à demanda requerida por uma argamassa desenvolvida integralmente com agregado médio, como o AMN.

Neste sentido, de acordo com os resultados obtidos no ensaio de área de superfície específica, pressupõe-se que a substituição de AMN por RNS poderá conduzir a uma redução da fluidez das argamassas, devido a maior demanda de água ocasionada pelas partículas menores presentes na composição do RNS.

A distribuição do tamanho de partículas foi determinada com o objetivo de verificar se a distribuição das partículas se apresenta: contínua e bem graduada, isto é, possui partículas de todas as frações (considerada a ideal para o desenvolvimento de concretos e argamassas); descontínua, ou seja, com ausência de uma ou mais frações; ou uniforme, com partículas predominantemente de um mesmo tamanho. As curvas resultantes do ensaio estão apresentadas na Figura 13, assim como, as zonas ótimas e as zonas utilizáveis, recomendadas pela NBR 7211 (ABNT, 2022a).



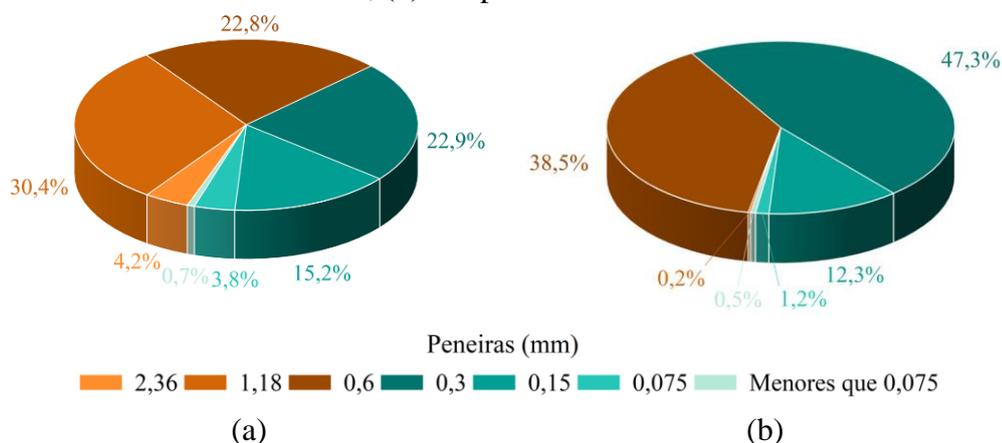
Fonte: Autora (2024).

De acordo a Figura 13, observa-se que as curvas de distribuição do tamanho de partículas de ambos os agregados se encontram praticamente dentro da zona utilizável recomendada por norma, com exceção de uma fração de, aproximadamente, 5 % em massa do RNS, na peneira com abertura de malha de 1,18 mm, em razão da ausência de partículas com essa fração no material.

Verifica-se que a curva do AMN se apresenta na forma de “S” suave e alongado na horizontal, caracterizando a distribuição do tamanho de partículas do material como contínua e bem graduada, possuindo quantidades semelhantes de partículas de todas as frações e com material fino suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores. A curva do RNS, por sua vez, se apresenta na forma de “S” menos suave e mais alongado na vertical, caracterizando a distribuição do tamanho de partículas do material como uniforme (FARIAS; PALMEIRA; BEJA, 2017).

Adicionalmente, a quantidade retida nas peneiras com abertura de malha de 0,6 e 0,3 mm, representam mais de 85 % da composição do RNS, confirmando, desta forma, a uniformidade das partículas do resíduo. Além disso, o RNS ainda apresenta carência de partículas iguais ou maiores a 1,18 mm. Na Figura 14 pode ser visualizada a quantidade referente a cada fração retida nas peneiras de 2,36, 1,18, 0,60, 0,30, 0,15, 0,075 mm e menores que 0,075 mm de ambos os agregados.

Figura 14 – Percentual das partículas dos agregados retidas nas peneiras: (a) partículas do AMN; (b) das partículas do RNS.



Fonte: Autora (2024).

Constata-se a DMC de 2,36 mm para o AMN e de 1,18 mm para o RNS, e um MF de 2,72 e de 2,23, respectivamente. Estes resultados corroboram que o RNS se apresenta mais fino que o AMN, sendo este último considerado como um agregado médio e o RNS considerado como um agregado médio a fino, de acordo com a classificação da NBR 7211 (ABNT, 2022a).

Uma distribuição uniforme e com a ausência de frações, como observado para o RNS, pode acarretar em um aumento do teor de vazios. Esse maior teor de vazios é causado pela falta de empacotamento das partículas, devido a distribuição uniforme com partículas majoritariamente do mesmo tamanho. Uma argamassa preparada com um agregado que apresenta estas características, pode sofrer redução da fluidez e demandar um teor maior de pasta para manter a trabalhabilidade, comparativamente, àquela preparada com um agregado com distribuição bem graduada, como o AMN (LOPES; PEÇANHA; CASTRO, 2020).

Os ensaios de absorção de água, massa unitária, material fino e massa específica, apresentados na Tabela 5, foram realizados a fim de comparar as principais propriedades físicas dos agregados e correlacionar com os resultados dos ensaios com as argamassas. Entre parênteses é apresentado o desvio padrão de cada resultado.

Tabela 5 – Propriedades físicas dos agregados.

Propriedade	Unidade	AMN	RNS
Absorção de água	%	0,62 (0,02)	0,70 (0,03)
Massa unitária solta	g/cm ³	1,52 (0,01)	1,34 (0,01)
Massa unitária compactada	g/cm ³	1,60 (0,01)	1,41 (0,01)
Teor de material fino	%	2,74 (0,18)	2,75 (0,15)
Massa específica	g/cm ³	2,52 (0,02)	2,49 (0,02)

Fonte: Autora (2024).

Constata-se que todas as propriedades físicas determinadas apresentam resultados próximos para ambos os agregados. Para a absorção de água, o AMN apresentou 0,62 % de absorção, enquanto o RNS 0,70 %. O AMN e o RNS demonstraram resultados de massa unitária solta de 1,52 g/cm³ e 1,34 g/cm³, respectivamente. Já para a massa unitária compactada, apresentam 1,60 g/cm³ e 1,41 g/cm³, respectivamente. Os dados foram semelhantes para o teor de material fino, onde o AMN exibiu um teor de 2,74 % e o RNS 2,75 %. A massa específica também retratou valores aproximados sendo eles de 2,52 e 2,49 g/cm³, para o AMN e RNS, respectivamente.

Um agregado que exibe uma alta absorção de água possui, em seu interior, uma ampla quantidade de poros. Esses poros, se conectados uns aos outros, permitem que uma maior quantidade de água seja absorvida (FARIAS; PALMEIRA; BEJA, 2017). Segundo Nedeljković *et al.* (2021), os valores de absorção de água de agregados miúdos naturais variam de 0,15 a 4,10 %. Adicionalmente, Benarchid *et al.* (2019) encontraram uma absorção de água próxima às obtidas nesta pesquisa, sendo ela de 0,87 % para o agregado miúdo natural.

Neste sentido, conforme observado, ambos os agregados apresentam valores dentro da faixa normalmente referenciada pela literatura, assim como exibem valores baixos, demonstrando que possuem uma estrutura compacta e com baixa porosidade. No entanto, o maior valor de absorção constatado para o RNS indica que as argamassas preparadas com o resíduo poderão demandar por acréscimo de água para manter a fluidez, comparado às argamassas preparadas com o AMN, que apresentou um valor menor para esta propriedade.

A massa unitária, por sua vez, refere-se a massa das partículas do agregado que ocupam um determinado volume, considerando os vazios externos às partículas, devido ao empacotamento. Sendo essa uma propriedade amplamente utilizada para o cálculo de dosagens em volume. Verifica-se que, para ambos os agregados, tanto a massa unitária solta (sem compactação) quanto a massa unitária compactada (quando há a compactação para a redução dos vazios entre as partículas) apresentam valores inferiores para o RNS comparado ao AMN.

Esse fato pode ser atribuído, segundo Santos (2015), à distribuição do tamanho de partículas, pois um agregado que apresenta uma distribuição uniforme e com ausência de uma ou mais frações, pode ocasionar em uma redução da massa unitária, em razão do aumento do teor de vazios. Além disso, esse menor valor observado para o RNS poderá favorecer para a redução da densidade de massa. As massas unitárias dos agregados estudados estão de acordo com a de agregados naturais normalmente utilizados na construção civil, variando de 1,30 a 1,75 g/cm³ (AMANCIO *et al.*, 2020; CARASEK *et al.*, 2016; FROTTE *et al.*, 2017; MEHTA; MONTEIRO, 2014; MENDES; BORJA, 2007; SANTOS, 2015).

A presença de material fino em um agregado, em grandes quantidades, pode afetar a demanda de água da argamassa, já que partículas pequenas possuem maior área de superfície específica, necessitando, assim, de uma quantidade de água superior em torno delas para manter a fluidez. Contudo, um agregado com uma quantidade de material fino de até 5 %, segundo a recomendação da NBR 7211 (ABNT, 2022a), pode melhorar o empacotamento e a reologia do sistema (KRUGER *et al.*, 2020).

Os teores de material fino, tanto do AMN quanto do RNS, estão de acordo com o exibido por Benarchid *et al.* (2019), que obtiveram um teor de 2,70 % para o agregado miúdo natural. Desta forma, os teores encontrados nesta pesquisa estão coerentes com a literatura e abaixo do limite máximo normativo, e podem, inclusive, auxiliar na coesão e na trabalhabilidade das argamassas desenvolvidas com ambos os agregados.

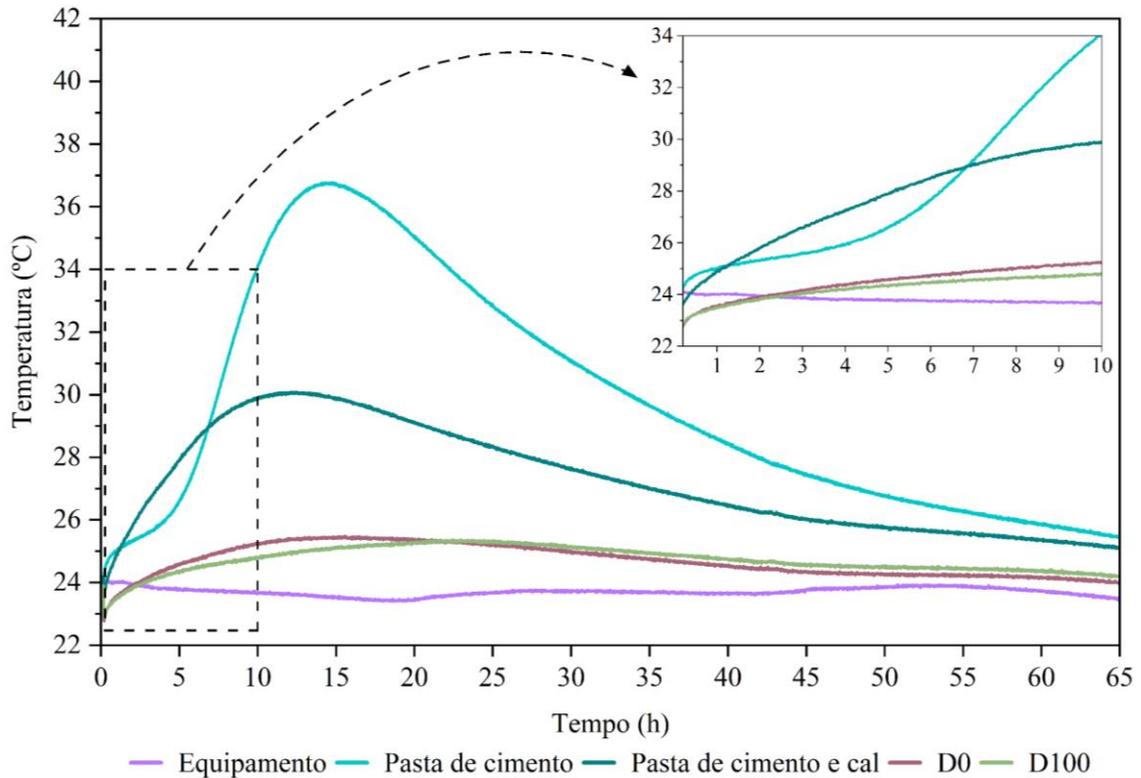
Por meio da massa específica é possível determinar o consumo de cada insumo utilizado no desenvolvimento de matrizes cimentícias, de modo a obter uma dosagem precisa e com maior controle das quantidades dos constituintes. Nesse caso, como os agregados estudados apresentam valores de massa específica semelhantes, as argamassas desenvolvidas tanto com AMN quanto com RNS, apresentariam um volume semelhante, proporcionando um rendimento similar (NEVILLE, 2016). Ademais, os resultados constatados para ambos estão em conformidade com a massa específica de agregados naturais normalmente utilizados na construção civil, variando de 2,50 a 2,70 g/cm³ (AMANCIO *et al.*, 2020; NEDELJKOVIĆ *et al.*, 2021; SANTOS; FONTES; LIMA, 2017; SILVA *et al.*, 2021).

5.2 ETAPA III – ANÁLISE TÉRMICA DO CIMENTO

A análise térmica calorimétrica foi realizada a fim de determinar o tempo correspondente ao período de indução, ou de dormência, dos mecanismos de hidratação do cimento utilizado para o desenvolvimento das argamassas. A Figura 15 apresenta as curvas térmicas em função do tempo para as quatro amostras estudadas.

Para identificar o período de indução e as demais fases da análise térmica, seguiu-se o descrito no trabalho de Gartner *et al.* (2001). Constata-se que para todas as amostras não foi possível mensurar o período de pré-indução do cimento, que é caracterizado por um pico exotérmico inicial nos primeiros 15 min de ensaio. Isso ocorreu devido ao tempo necessário para o procedimento de mistura dos constituintes, bem como para o efetivo acondicionamento e confinamento da amostra no equipamento, que demandou um tempo de, aproximadamente, 10 min por amostra, impossibilitando a mensuração desse pico inicial.

Figura 15 – Curvas térmicas para a determinação do período de indução do cimento.



Fonte: Autora (2024).

Verifica-se também, na Figura 15, comportamentos distintos das curvas térmicas das quatro amostras estudadas. As argamassas, D0 e D100, exibiram um comportamento semelhante, apresentando uma variação térmica máxima, em relação a temperatura ambiente, de 2,00 °C (em torno de 15 h) e de 1,75 °C (em torno de 24 h), respectivamente. Para ambas, entretanto, não foi possível observar o segundo pico exotérmico, que ocorre normalmente por volta de 12 h de ensaio.

A pasta composta por cimento e cal, por sua vez, exibiu um segundo pico exotérmico não muito acentuado, em aproximadamente 12 h de ensaio, chegando a uma variação térmica máxima em relação a temperatura ambiente de 6,46 °C. Apesar de apresentar o segundo pico, para essa amostra também não foi possível constatar o período de indução, já que não foi observado uma diminuição da temperatura para o posterior aumento até o segundo pico, sendo esse o comportamento que caracteriza o período de indução.

Por outro lado, para a pasta desenvolvida apenas com cimento e água, foi possível constatar o período de indução. Na ampliação do gráfico da Figura 15, observa-se uma leve estabilidade da temperatura pelo período de 1 a 3 h de ensaio. Esse período antecede o segundo pico exotérmico que, inclusive, foi expressivo chegando a uma variação térmica máxima, em

relação a temperatura ambiente, de 13,22 °C, em torno de 14 h de ensaio. Dado que a análise térmica foi realizada exclusivamente para a obtenção do período de indução do cimento, utilizou-se a curva da pasta desenvolvida apenas com cimento e água, sendo essa a amostra onde observou-se o período de indução.

Em relação ao período de pré-indução do cimento (não mensurado para as amostras), Agostinho *et al.* (2020) explicam que a mistura dos constituintes pode ser feita dentro do próprio equipamento ou externo a ele (argamassadeira). A primeira alternativa possibilita a aquisição dos dados iniciais da variação de temperatura, ou seja, do pico exotérmico inicial, já que a análise é realizada desde os primeiros instantes da hidratação do cimento.

Já a segunda alternativa, adotada para este estudo, garante uma homogeneização mais eficiente que a primeira, porém perde as informações do período de pré-indução, pois as reações já estão ocorrendo quando a amostra é inserida no equipamento. Ressaltando que o equipamento utilizado não permite a homogeneização interna e o interesse específico pela determinação do período de indução do cimento e não pelas reações imediatas, realizou-se a homogeneização externa dos constituintes.

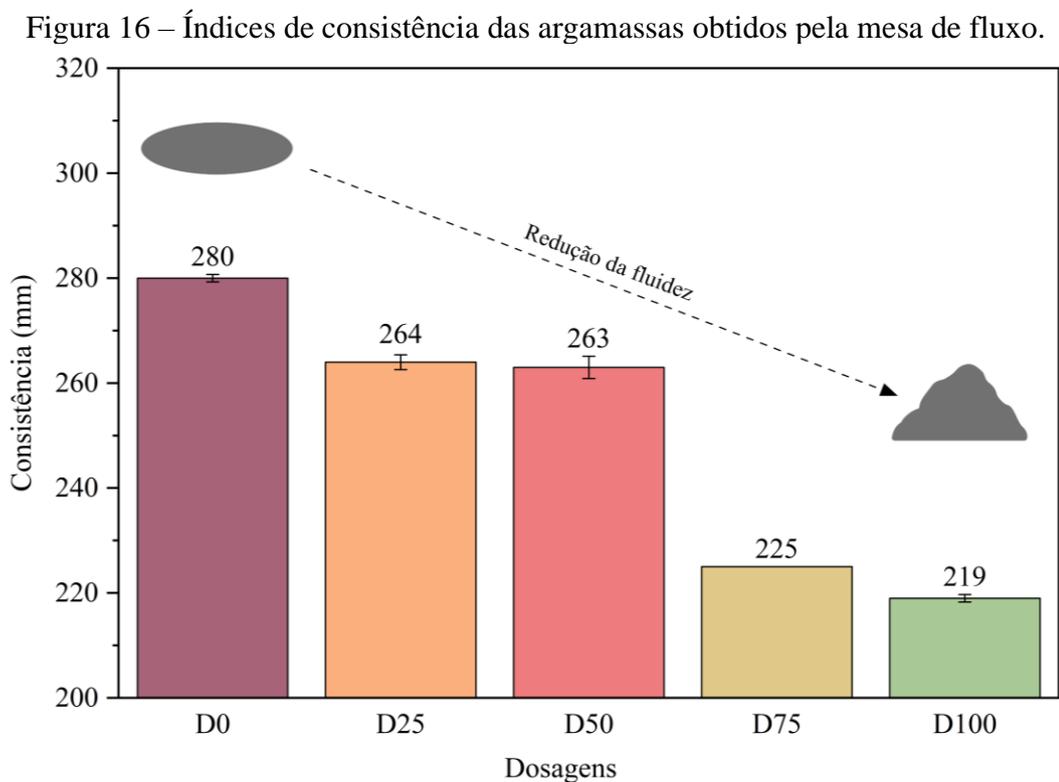
O período de indução é caracterizado por uma baixa reatividade do cimento, isto é, as reações de hidratação diminuem drasticamente devido à deposição de uma camada de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) sobre as partículas de cimento, fazendo com que a fase anidra e a fase aquosa fiquem separadas por essa camada. Esse período normalmente tem duração de 30 min a 4 h e finaliza quando essa camada se rompe ou se torna permeável. Durante o período de indução, a consistência da amostra se mantém constante até o início da pega, que ocorre na fase seguinte (GAWLICKI; NOCUŃ-WCZELIK; BAŃK, 2010; BEAUDOIN; ODLER, 2019).

Sendo assim, como verificado que o cimento utilizado possui um período de indução ocorrendo entre 1 e 3 h após o contato com a água, optou-se por realizar os ensaios 1 h após a mistura dos constituintes. Ou seja, após o período das reações iniciais (pico inicial) e durante o período de indução (estágio que antecede o segundo pico). Pois, assim, evita-se a influência da grande liberação de energia proveniente da dissolução/precipitação dos primeiros compostos de hidratação do cimento, que poderiam influenciar os resultados dos ensaios realizados no estado fresco das argamassas (MAKAR; CHAN; ESSEGHAIER, 2007).

5.3 ETAPA IV – ANÁLISE REOLÓGICA DAS ARGAMASSAS

5.3.1 Índice de consistência

O ensaio de índice de consistência foi realizado com a finalidade de determinar a relação a/a, bem como utilizá-lo como um indicativo de trabalhabilidade das argamassas. No que se refere à relação a/a, após testes preliminares de índice de consistência (ver 4.2.1) chegou-se em uma relação de 1,6. Essa relação foi adotada para todas as dosagens e, com isso, tornou-se possível avaliar individualmente a alteração da fluidez devido à utilização do RNS em substituição ao AMN. A Figura 16 apresenta o índice de consistência obtido para as argamassas.



Fonte: Autora (2024).

Observa-se que há uma redução da fluidez à medida que se aumenta o teor de RNS, sendo a argamassa de referência, D0, a que apresentou o maior espalhamento, ou seja, a maior fluidez. A D25 e a D50 apresentaram consistências semelhantes e inferiores a D0. A redução da fluidez foi mais acentuada para a D75 e para a D100, sendo esta última a mais consistente, exibindo uma redução de 61 mm de espalhamento, quando comparado com a D0. Considerando que a relação a/a foi a mesma, percebe-se que o acréscimo de RNS demanda uma maior quantidade de água para manter a mesma trabalhabilidade da argamassa sem RNS.

Esse aumento da demanda de água pode estar relacionado com a distribuição do tamanho de partículas dos agregados, visto que essa propriedade influencia diretamente na consistência das argamassas (CARASEK *et al.*, 2016). Agregados com uma distribuição bem graduada, como observado para o AMN, demandam uma quantidade de água inferior quando comparado a agregados com uma distribuição mal graduada, isto é, agregados que apresentam ausência de partículas em determinadas malhas e com predominância de partículas do mesmo tamanho, como observado para o RNS.

Segundo Carneiro e Cincotto (1999), agregados que exibem uma curva bem graduada permitem que as partículas menores preencham os interstícios das maiores, ocasionando um melhor rolamento e um melhor empacotamento entre as partículas e promovendo, conseqüentemente, uma melhor fluidez da mistura. Cardoso (2009) complementa que, agregados com menor teor de vazios (em razão do melhor empacotamento entre as partículas), por possuírem um menor índice de vazios disponíveis são, à vista disso, preenchidos por uma menor quantidade de pasta. Isso faz com que reste uma quantidade de pasta elevada para afastar as partículas, reduzindo o atrito interno e proporcionando um aumento da fluidez.

Outra característica do agregado miúdo que possui forte influência no desempenho reológico de argamassas e que afeta diretamente a demanda de água dos traços é a massa unitária. Esse parâmetro foi estudado por Carasek *et al.* (2016), Carneiro, Cincotto e John (1997) e De Schutter e Poppe (2004), onde os autores concluíram em seus respectivos trabalhos que a massa unitária do agregado é o parâmetro que melhor explica a consistência das argamassas, sendo que quanto menor a massa unitária do agregado, menos fluida a argamassa.

Isso se deve ao fato de que a massa unitária considera, simultaneamente, fatores que influenciam no empacotamento, como a distribuição do tamanho de partículas, a forma e a geometria das partículas, o teor de frações finas e de vazios, dentre outras propriedades. Adicionalmente, quanto mais irregular a superfície do agregado, menor é a eficiência do empacotamento das partículas. Atrelado a isso, um formato anguloso também interfere no grau de empacotamento, já que essa irregularidade gera, conseqüentemente, uma maior quantidade de arestas, causando um maior atrito interno entre as partículas, dificultando a rolagem e a acomodação do sistema (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009; CARASEK *et al.*, 2016).

A mesma situação foi constatada no presente estudo, uma vez que o RNS apresentou uma massa unitária inferior a do AMN, fazendo com que a substituição de AMN por RNS diminuísse a fluidez das argamassas. Como o RNS exibiu um menor empacotamento, devido a sua distribuição do tamanho de partículas, bem como uma geometria mais irregular e

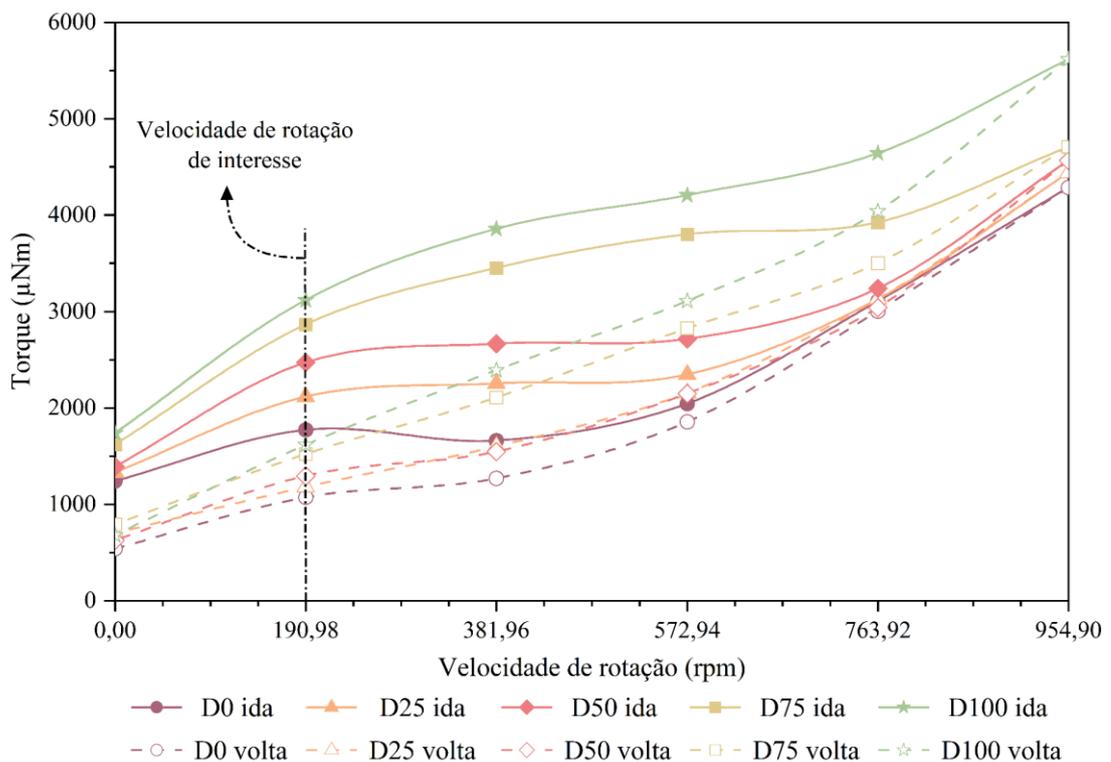
com uma composição mais fina quando comparado ao AMN, a redução da fluidez, pode, também, ser atribuído ao valor inferior de massa unitária observado para o resíduo.

Por fim, as argamassas desenvolvidas com 75 % (D75) e 100% (D100) de RNS, apresentaram um índice de consistência médio de 225 e 219 mm, respectivamente. Sendo, portanto, aquelas com menor espalhamento das cinco dosagens. Argamassas com espalhamento de até 200 mm, segundo Formosa (2011), garantem ainda uma consistência adequada para o correto manuseio. No entanto, devido ao aspecto e à trabalhabilidade apresentados por ambas as argamassas, recomenda-se um estudo para a adição de aditivos modificadores de viscosidade, a fim de garantir uma adequada aplicação dessas dosagens. Este tópico será melhor explicado na discussão dos resultados do ensaio de resistência à compressão de prisma.

5.3.2 Reometria rotacional

A reometria rotacional foi realizada a fim de mensurar a trabalhabilidade das argamassas, uma vez que essa propriedade é comumente quantificada com base na facilidade ou dificuldade em manuseá-la. Apresenta-se na Figura 17 as curvas de fluxo geradas a partir dos valores de torque e velocidade de rotação, descrevendo o perfil reológico das argamassas.

Figura 17 – Curvas de fluxo das argamassas obtidas pela reometria rotacional.



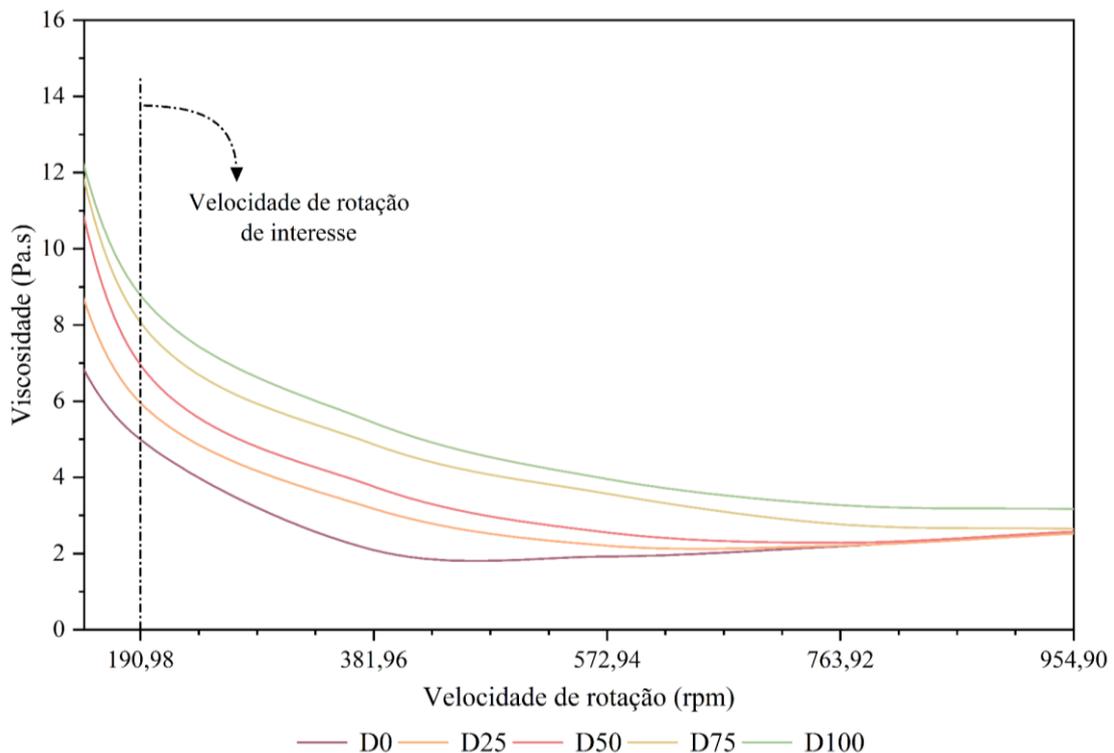
Fonte: Autora (2024).

Constata-se que o acréscimo de RNS nas argamassas conduz a um aumento da resistência ao fluxo, levando em conta que à proporção em que se aumenta o teor de resíduo, o torque se intensifica para uma mesma velocidade de rotação. Na velocidade de rotação de interesse, de 190,98 rpm na aceleração (ida), a D100 apresentou um torque de 3117 μNm , enquanto a D75 exibiu o valor de 2865 μNm . Para a D50 e a D25, os valores foram de 2470 e 2115 μNm , respectivamente. Por fim, a D0 apresentou o menor torque de 1772 μNm .

Percebe-se, ainda, um aumento do torque de escoamento (torque inicial necessário para o material escoar) à medida em que se acrescenta RNS nas argamassas. Em valores numéricos, a D100 exibiu um valor de 1739 μNm , retratando o maior torque de escoamento dentre as amostras estudadas. A D75 apresentou um torque de 1619 μNm , seguida da D50 e D25 com valores próximos de 1391 e 1329 μNm , respectivamente. A D0, por sua vez, apresentou o menor torque de escoamento, com valor de 1241 μNm .

Na Figura 18 apresentam-se as curvas de viscosidade aparente, onde verifica-se o aumento das viscosidades com o acréscimo de RNS. Especialmente na velocidade de rotação de interesse, observa-se o maior valor para a D100 com uma viscosidade de 8,78 Pa.s. A D75, por sua vez, apresentou o valor de 8,07 Pa.s, seguida da D50 e da D25, com valores de 6,96 e 5,96 Pa.s, respectivamente. Já a D0 exibiu a menor viscosidade, sendo ela de 4,99 Pa.s.

Figura 18 – Curvas de viscosidade aparente das argamassas obtidas pela reometria rotacional.



Fonte: Autora (2024).

Além disso, as curvas de todas as dosagens exibem um comportamento tixotrópico, onde as curvas ascendentes apresentam valores de torque maiores do que as curvas descendentes, resultando em áreas de histerese. A partir de valores numéricos das áreas de histerese fornecidas pelo reômetro com base nas curvas geradas, é possível verificar um comportamento crescente dessa área em função do aumento do teor de RNS, visto que para D100 a área resultante foi de 5,35 kPa/s, para D75 foi de 4,42 kPa/s, para D50 foi de 4,02 kPa/s, enquanto para D25 e D0 foram de 3,91 e 3,76 kPa/s, respectivamente.

Nota-se, portanto, que o aumento do teor de RNS nas argamassas provoca um aumento do torque, da resistência ao escoamento, da viscosidade e da área de histerese, para uma mesma velocidade de rotação, sendo os maiores valores observados para a D100.

Esse aumento da viscosidade verificado com o acréscimo de RNS nas argamassas, também é relatada por autores que utilizaram outros tipos de resíduos de mineração em argamassas (ARGANE *et al.*, 2016; AZEVEDO *et al.*, 2019; BENARCHID *et al.*, 2019). Essa situação pode estar associada, principalmente, com a morfologia e a distribuição do tamanho de partículas do material, assim como, com a área de superfície, a forma, a geometria e o aspecto da superfície dessas partículas pois, segundo Bentz *et al.* (2012), esses parâmetros influenciam diretamente na reologia de matrizes cimentícias.

Em relação à forma, à geometria e o aspecto da superfície do agregado, autores (JAMKAR; RAO, 2004; WESTERHOLM *et al.*, 2008; SHEN *et al.*, 2016; YAMEIA; LIHUA, 2017) explicam que estas características influenciam fortemente na viscosidade de matrizes cimentícias. Uma vez que agregados que exibem partículas com uma superfície rugosa, uma maior relação comprimento/largura e uma menor circularidade, demandam maior quantidade de água comparado à agregados que exibem partículas com uma superfície lisa e arredondada. Agregados extraídos do leito de rios normalmente são arredondados e com uma superfície mais lisa, como é o caso do AMN. Já os oriundos de britagem costumam ser mais angulares e com uma superfície rugosa, como é o caso do RNS (AHN; FOWLER, 2001).

Outra característica que Benabed *et al.* (2012) e Reddy e Gupta (2008) demonstram interferir de maneira acentuada na viscosidade das argamassas é a finura do agregado, uma vez que os autores relatam que agregados com uma composição mais fina possuem uma área de superfície maior e, conseqüentemente, necessitam de maior quantidade de água para molhar a superfície, ocasionando um aumento da viscosidade.

Atrelado ao diâmetro do agregado, Farokhzad *et al.* (2016) e Stolz e Masuero (2018) discorrem sobre a influência da distribuição do tamanho de partículas na viscosidade de matrizes cimentícias. Dado que, uma proporção adequada de partículas de tamanhos diferentes

promove uma melhor interação das partículas e um empacotamento ótimo para a matriz, como observado na distribuição do AMN. Por outro lado, partículas com diâmetros majoritariamente semelhantes ocasionam uma menor densidade de empacotamento, resultando em um maior teor de vazios, como constatado na distribuição do RNS (MOOSBERG-BUSTNES; LAGERBLAD; FORSSBERG, 2004).

Neste sentido, considerando que o resíduo é proveniente da britagem de rochas e que em razão do seu processamento se apresenta irregular e rugoso, bem como apresenta uma composição mais fina e uma distribuição de partículas uniforme, acredita-se que essas características podem ter contribuído para o aumento da viscosidade com o acréscimo de RNS.

O comportamento tixotrópico observado nas curvas de fluxos das argamassas é um comportamento esperado para este tipo de sistema cimentício e pode ter ocorrido devido às altas viscosidades medidas, que formam uma estrutura em rede. Esse fenômeno é caracterizado pela existência do movimento Browniano e de interações coloidais, que aproximam as partículas do material e formam um sistema estruturado. Quando uma força externa aplicada é superior às forças internas de aglomeração, os aglomerados se rompem e o sistema é capaz de escoar (CARLESSO, 2015; ROUSSEL, 2006).

Atrelado a isso, as áreas de histerese, de acordo com Roussel (2006), retratam a energia necessária para quebrar as estruturas formadas sob ação de um cisalhamento e expressam, também, que a taxa de desestruturação é maior que a taxa de estruturação, devido à instabilidade dos materiais cimentícios. Isto é, uma maior área de histerese indica uma maior ruptura da estrutura das argamassas (CARDOSO *et al.*, 2014).

O comportamento crescente da histerese observado para as argamassas com o acréscimo de RNS pode ser atribuído à instabilidade da matriz cimentícia e à intensificação na formação de aglomerados que, conseqüentemente, necessitou de uma maior energia para romper as estruturas formadas (CARLESSO, 2015). Segundo a autora, as áreas são úteis para auxiliar na comparação interna do comportamento das argamassas; todavia, não fornecem uma análise quantitativa desse comportamento, já que dependem dos protocolos de ensaio adotados.

Em relação ao desempenho e ao controle tecnológico de argamassas, o torque de escoamento é um parâmetro de suma importância, devido à necessidade de escoamento da argamassa, seja por meio do bombeamento ou por meio do lançamento manual (KOSTRZANOWSKA-SIEDLARZ, 2020). O torque de escoamento não possui um valor ideal pré-determinado para argamassas, haja vista que se deve considerar o método de aplicação, a finalidade, dentre outras características da técnica aplicada. No entanto, um torque suficientemente baixo é desejado, a fim de possibilitar um adequado bombeamento, manuseio

e aplicação do material, ao mesmo tempo que deve apresentar um torque suficientemente alto para evitar a segregação e permanecer em contato com o substrato (CARDOSO, 2009).

Em suspensões, o torque de escoamento se origina quando há a presença de partículas aglomeradas que formam uma rede tridimensional rígida (OLIVEIRA *et al.*, 2000). À vista disto, as argamassas apresentam um maior torque de escoamento ao passo que se aumenta o teor de RNS em suas composições. Este fato pode ser atribuído a maior aglomeração de partículas do RNS, em razão da sua maior área de superfície e da superfície rugosa, quando comparado com o AMN, visto que, conforme Arcaro (2016), partículas com essas características são suscetíveis à aglomeração devido a facilidade de contato entre si.

Dentre os constituintes que compõem uma matriz cimentícia, a água é um dos principais fatores que influenciam no comportamento reológico das misturas. Isso se deve ao fato de que a água, primeiro, preenche os poros ou vazios presentes entre as partículas sólidas. Após preencher quase a totalidade desses vazios, a água restante auxilia na fluidez do material, pois atua diminuindo o contato entre os sólidos e aumenta a área de superfície de contato entre os sólidos e o líquido que, conseqüentemente, provoca um aumento da fluidez (BANFILL, 1991; KISMI; SAINT-ARROMAN; MOUNANGA, 2012).

Desta forma, considerando que a relação *a/a* utilizada para as argamassas foi fixada e que o RNS apresentou um menor empacotamento das partículas, isso pode ter ocasionado vazios na matriz. Ou seja, quanto maior o teor de vazios da argamassa (oriundo do acréscimo de RNS), maior a demanda de água para lubrificar o sistema. Assim, a relação *a/a* para as argamassas contendo RNS pode ser aumentada, a fim de proporcionar uma melhor fluidez. Todavia, esse aumento deve ser tal que não provoque a segregação dos materiais, nem a queda acentuada das resistências mecânicas, o que prejudicaria o desempenho das argamassas.

No que se refere ao aumento da relação *a/a* e, por consequência, um maior volume de pasta, Westerholm *et al.* (2008) declaram que a influência das propriedades do agregado miúdo em argamassas depende, em grande parte, do volume de pasta. Logo, é possível reduzir os efeitos negativos de agregados mal graduados, por exemplo com o aumento da quantidade de pasta. Isso acontece devido ao aumento da distância entre as partículas e da redução do volume de agregado, reduzindo essa interferência. Os autores ainda afirmam que o aumento de pasta pode propiciar uma redução do torque de escoamento da argamassa.

Diante do exposto, constata-se que o aumento do teor de RNS nas argamassas causa um aumento da resistência ao fluxo, do torque de escoamento, da viscosidade, assim como da área de histerese. Além disso, o valor crescente das áreas de histerese, à medida que se adiciona RNS nas argamassas, reforça a instabilidade dessas misturas, indicando uma maior formação

de aglomerados e, devido a isso, uma maior demanda de energia para romper essas estruturas formadas. Atribuiu-se a algumas características do agregado como as principais responsáveis pelos resultados obtidos, como: a distribuição do tamanho de partículas, a área de superfície, bem como a morfologia e o aspecto da superfície das partículas.

O RNS, no âmbito reológico, apesar de conduzir a uma redução gradativa da fluidez, não impossibilita sua utilização no desenvolvimento de argamassas, principalmente com o teor de 50 % de utilização, onde a trabalhabilidade se demonstrou adequada para seu manuseio. Já as argamassas D75 e D100, a fim de facilitar a sua aplicação e evitar falhas nas juntas, recomenda-se um estudo para a adição de aditivos modificadores de viscosidade. Neste sentido, indica-se a dosagem D50 como a mais promissora no âmbito reológico, apresentando propriedades reológicas adequadas para seu manuseio e contribuindo para a valorização do RNS em substituição a 50 % do agregado miúdo convencional.

5.3.3 Correlações entre o índice de consistência e a reometria rotacional

A adequação da trabalhabilidade é fortemente desejada para uma argamassa, contudo essa característica é tida como relativa, uma vez que depende de inúmeras variáveis, dentre elas a técnica de avaliação aplicada. Neste estudo, duas técnicas foram abordadas: o índice de consistência e a reometria rotacional. A primeira, apesar de amplamente utilizada devido a sua facilidade de execução e baixo custo, é considerada como uma técnica incompleta de medição reológica. A segunda, por sua vez, é pouco utilizada devido à sua complexidade e ao elevado custo do equipamento, porém é considerada uma técnica eficiente para a compreensão do comportamento reológico e de determinação da viscosidade de argamassas. Neste contexto, buscou-se estabelecer correlações entre os ensaios, a partir dos parâmetros gerados por eles (Tabela 6).

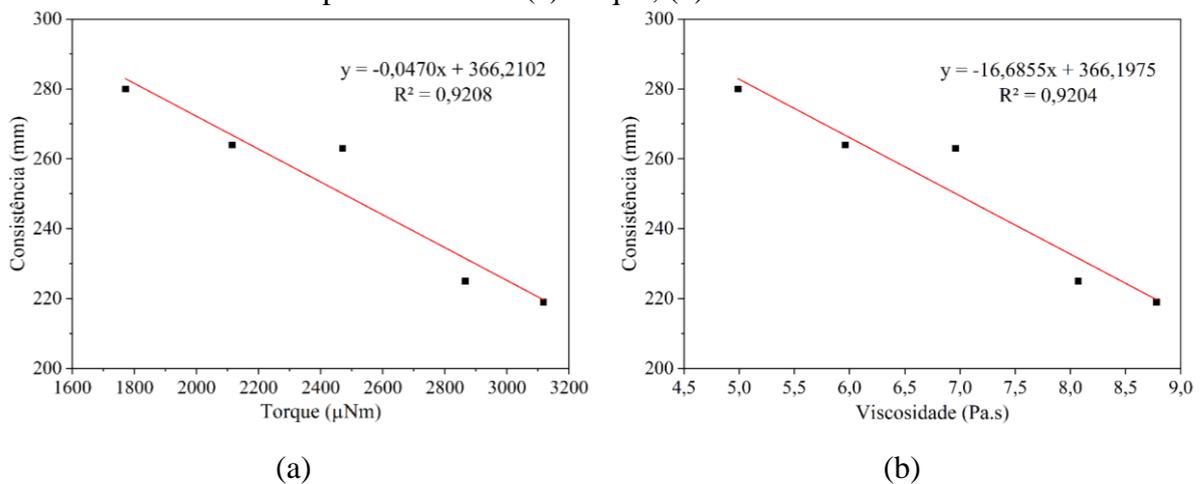
Tabela 6 – Parâmetros gerados pelo índice de consistência e reometria rotacional.

Ensaio	Parâmetros gerados	D0	D25	D50	D75	D100
Índice de consistência	Consistência (mm)	280	264	263	225	219
Reometria rotacional	Torque na rotação de 190,98 rpm (μNm)	1772	2115	2470	2865	3117
	Viscosidade na rotação de 190,98 rpm (Pa.s)	4,99	5,96	6,96	8,07	8,78

Fonte: Autora (2024).

Verifica-se que com a diminuição da consistência, o torque e a viscosidade aumentam. Desta forma, constata-se que o parâmetro gerado pelo ensaio de índice de consistência possui um comportamento inverso aos parâmetros gerados pelo ensaio de reometria rotacional. Assim, com o intuito de estabelecer correlações entre ambos os ensaios, definiu-se os coeficientes de determinação (R^2) entre os parâmetros apresentados na Tabela 6, que podem ser visualizados na Figura 19.

Figura 19 – Coeficientes de determinação (R^2) entre a consistência e os parâmetros gerados pela reometria: (a) torque; (b) viscosidade.



Fonte: Autora (2024).

Observa-se que as linhas de tendência lineares se ajustam bem aos pontos, onde foram obtidos um $R^2 = 0,9208$ entre a consistência e o torque, e um $R^2 = 0,9204$ entre a consistência e a viscosidade. Considerou-se, nesta pesquisa, como uma boa correlação os valores de R^2 entre 0,70 e 0,90. Valores de R^2 acima de 0,90, considerou-se como uma forte correlação. Sendo assim, com base nos valores de R^2 , constata-se que o parâmetro gerado pelo índice de consistência possui uma forte correlação com os parâmetros de torque e de viscosidade (valores de R^2 semelhantes).

Adicionalmente, verifica-se que as inclinações das linhas de tendência de ambos os parâmetros, torque e viscosidade, apresentam-se muito similares. Este fato pode ser atribuído a uma possível relação existente entre os parâmetros, dado que a viscosidade aumenta na mesma proporção que o torque à medida em que se acrescenta RNS nas dosagens, refletindo nas inclinações similares observadas.

Diante dos resultados obtidos, demonstra-se que o ensaio de índice de consistência, apesar de expressar como resultado apenas um valor unitário em milímetros e não um perfil reológico, atua como um bom indicativo da trabalhabilidade de argamassas, apresentando fortes

correlações com os parâmetros gerados na reometria rotacional. Todavia, para análises mais aprofundadas a respeito do comportamento reológico, recomenda-se a análise por reometria rotacional ou outro método multiponto (mais de uma condição de solicitação), a fim de obter resultados em termos de unidades reológicas fundamentais e melhor caracterizar o estado fresco dessas misturas complexas e altamente concentradas.

5.4 ETAPA V – ANÁLISE FÍSICA E MECÂNICA DAS ARGAMASSAS

5.4.1 Teor de ar

O teor de ar foi determinado com o intuito de obter um indicativo da porosidade por meio da análise da quantidade de ar contida nas argamassas. A Tabela 7 apresenta os resultados do ensaio de teor de ar realizado.

Tabela 7 – Teor de ar das argamassas.

D0	D25	D50	D75	D100
1 %	2 %	4 %	5 %	5 %

Fonte: Autora (2024).

Observa-se um incremento gradativo do teor de ar com o acréscimo de RNS. A D0 apresentou um teor de 1 %, seguida da D25 e da D50 que apresentam teores de 2 e 4 %, respectivamente. Enquanto a D75 e a D100 apresentam o mesmo teor, sendo ele de 5 %. Todas as dosagens apresentaram valores bem inferiores ao limite máximo estabelecido pela NBR 13281-2 (ABNT, 2023b), cujo teor de ar para argamassas de assentamento deve ser igual ou inferior a 22 %.

O teor de ar, segundo Nsambu (2007), depende, principalmente, da quantidade de água das argamassas, do cimento utilizado, do processo de mistura (tempo e velocidade) e do volume ocupado pelos agregados. Considerando que a quantidade de água, o tipo de cimento e o processo de mistura foram idênticos para todas as dosagens, sugere-se que o incremento do teor de ar verificado ocorreu em razão do menor empacotamento das partículas do RNS, ocasionando uma maior quantidade de vazios nas argamassas (DU; FOLLIARD, 2005).

Carasek (2017) ressalta que um elevado teor de ar pode reduzir o contato da argamassa com a alvenaria, resultando em uma deficiência da aderência entre os componentes. Canova, Bergamasco e Neto (2007) complementam que argamassas com elevados teores de ar (acima de 16 %) podem conduzir a uma redução do desempenho mecânico e da capacidade de

aderência, dado que as bolhas de ar ocupam os espaços que seriam preenchidos pela pasta, resultando na diminuição dos produtos de hidratação. Além disso, a ASTM C-270 (ASTM, 2007) recomenda que o máximo teor de ar em argamassas com cal seja de 14 %.

O teor de ar é um indicativo da porosidade e está, intimamente, relacionado com a durabilidade de uma argamassa. De acordo com Quarcioni *et al.* (2009), a porosidade contribui para o acúmulo de umidade que, conseqüentemente, favorece a proliferação de fungos e a fissuração, quando submetida a ciclos de molhagem e secagem, com a expansão de sais dissolvidos dentro da matriz.

Ressalta-se que os teores encontrados estão de acordo com Silva (2006), Wang *et al.* (2022) e Zhang *et al.* (2021), que relatam que argamassas sem aditivos preparadas com agregados naturais comumente apresentam teores de ar na faixa de 2 a 7 %. Além disso, Stolz e Masuero (2018), utilizando três diferentes composições granulométricas de agregados naturais para produzir argamassas com o traço de 1:2:9, obtiveram teores variando entre 1,70 a 2,33 %. Neste sentido, os baixos teores de ar observados para as argamassas provavelmente não implicarão na redução da aderência, nem das resistências mecânicas no estado endurecido.

5.4.2 Retenção de água

A fim de verificar a capacidade das argamassas em manter a sua trabalhabilidade quando impostas a situações que provoquem a perda da sua água de amassamento, tanto pela evaporação quanto pela absorção do substrato, foi realizado este ensaio para a determinação da capacidade de retenção de água das argamassas. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 8 – Retenção de água das argamassas.

D0	D25	D50	D75	D100
88 %	87 %	87 %	90 %	92 %

Fonte: Autora (2024).

Nota-se que todas as argamassas, exceto a D100, apresentam uma retenção de água entre 88 e 90 %, classificando-as como U2, conforme a NBR 13281-1 (ABNT, 2023a). A D100, por sua vez, apresentou uma retenção de água superior a 90 %, classificando-a como U3. Além disso, todas as dosagens atenderam ao critério estabelecido pela NBR 13281-2 (ABNT, 2023b), cuja retenção de água deve ser igual ou superior a 85 %.

Observa-se um ligeiro incremento da retenção de água a partir da D75, que pode ser explicado devido à maior quantidade de partículas menores presentes na composição do

RNS. De acordo com Hoffmann (2015), partículas menores possuem maior área de superfície e, por esse motivo, adsorvem maior quantidade de água. Essa condição aumenta a capacidade de retenção de água das argamassas.

Segundo Reddy e Gupta (2008), a retenção de água de argamassas preparadas sem cal são sensíveis a distribuição do tamanho de partículas do agregado. No entanto, para argamassas mistas, de cimento e cal, a retenção não é fortemente afetada pelo agregado e, normalmente, apresentam uma melhor retenção de água quando comparado às argamassas de cimento, devido à presença das partículas finas da cal. Esta situação também foi observada neste estudo, onde o uso de até 100 % de RNS nas argamassas mistas de cimento e cal, alterou de forma tênue a retenção de água.

No estudo de Xu *et al.* (2022), os autores utilizaram resíduo de tijolo cerâmico como agregado miúdo e relataram um aumento da retenção de água das argamassas com o aumento do teor de resíduo. Martínez *et al.* (2013) utilizaram três diferentes tipos de agregados reciclados e também observaram melhora na capacidade de retenção de água das argamassas com a utilização desses materiais. Ambos os trabalhos mencionam que o menor tamanho das partículas dos resíduos foi o principal fator que influenciou nas caracterizações realizadas.

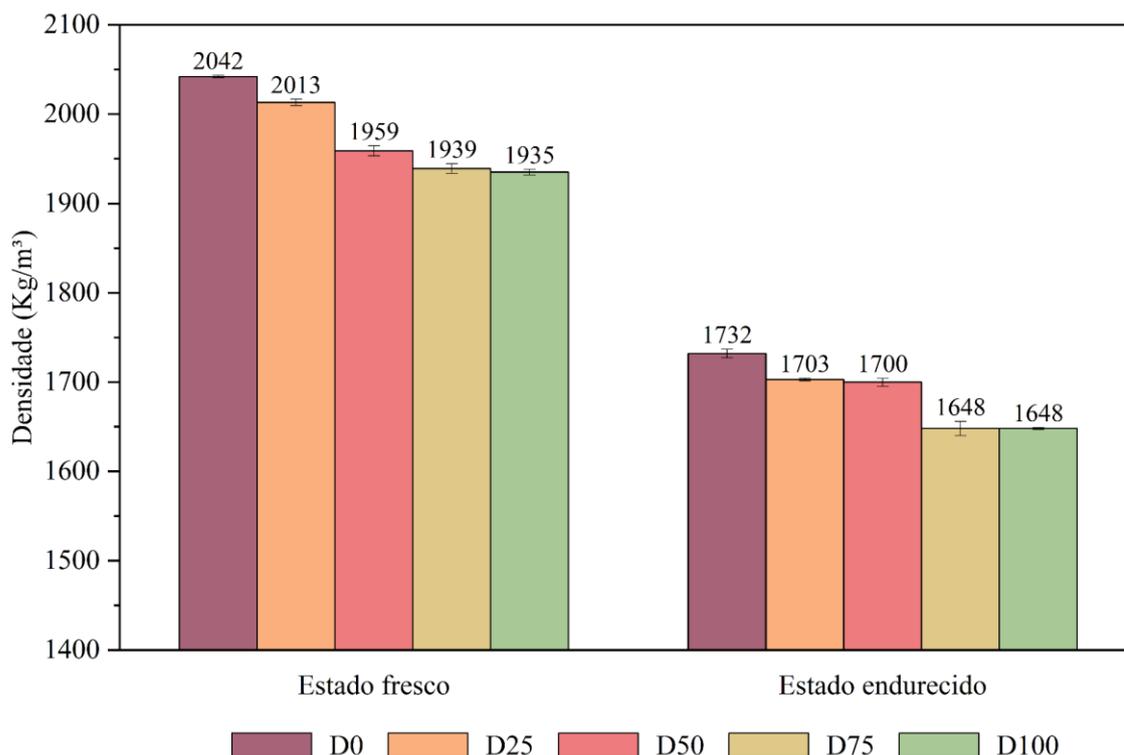
A alta retenção de água constatada é de extrema importância para um adequado desempenho tanto no estado fresco quanto no endurecido, visto que uma argamassa que facilmente perde água, enrijecerá muito rápido e, conseqüentemente, perderá trabalhabilidade. Essa situação faz com que o manuseio e o acabamento fiquem comprometidos, dificultando o assentamento, ocasionando falhas nas juntas e provocando queda da resistência de aderência com o bloco cerâmico. Ressalta-se, ainda, que uma baixa retenção de água causa uma rigidez acentuada na argamassa endurecida, implicando uma menor capacidade de absorção de deformações (CASALI, 2008; CARASEK, 2017).

Conforme observado, o aumento do teor de RNS provoca um sutil aumento da capacidade de retenção de água das argamassas estudadas, possivelmente devido à maior quantidade de partículas menores na composição do resíduo. Este fato indica que a substituição de AMN por RNS, em qualquer teor, é benéfica para essa propriedade, garantindo um endurecimento gradativo das argamassas, sem que ocorra a redução da trabalhabilidade devido à perda repentina de água.

5.4.3 Densidade de massa

O ensaio de densidade de massa das argamassas, tanto no estado fresco quanto no endurecido, foi realizado para avaliar a compacidade das argamassas, isto é, o resultado da relação entre os agregados e os aglomerantes para um determinado volume (Figura 20).

Figura 20 – Densidade de massa nos estados fresco e endurecido das argamassas.



Fonte: Autora (2024).

Percebe-se claramente um decréscimo na densidade à medida em que se aumenta a quantidade de RNS em substituição ao AMN, sendo esse comportamento observado tanto no estado fresco quanto no estado endurecido das argamassas. No estado fresco, a D0 e a D25 se enquadram na classificação DF4, com valores de densidade acima de 2000 kg/m³, enquanto a D50, D75 e D100 se enquadram na classificação DF3, com valores entre 1800 e 2000 kg/m³, conforme limites estabelecidos pela NBR 13281-2 (ABNT, 2023b). No estado endurecido, todas as dosagens se enquadram na classificação DE3, com valores entre 1600 e 1800 kg/m³, conforme limites estabelecidos pela NBR 13281-1 (ABNT, 2023a).

A densidade de uma argamassa depende, principalmente, da massa específica e da massa unitária dos seus constituintes, bem como do teor de ar presente na mistura (CARASEK, 2017). Desta forma, considerando que as massas específicas dos agregados apresentaram

valores próximos, a redução da densidade pode estar associada à massa unitária, que apresentou uma maior diferenciação entre si. Além disso, o menor empacotamento de partículas observado para o RNS pode ter ocasionado um maior teor de ar, o que contribuiria, também, em uma redução da densidade, já que o ar ocupa um volume e possui uma massa específica inferior à da argamassa (ARNOLD, 2011; NAKAKURA; CINCOTTO, 2004).

Os resultados obtidos se encontram na mesma faixa de valores obtidos em outros estudos que desenvolveram argamassas com agregados naturais e resíduos de mineração (CARASEK *et al.*, 2016; MENDES *et al.*, 2020a; TOKARSKI *et al.*, 2018). Inclusive, Mendes *et al.* (2020a), utilizando um resíduo da produção de rochas ornamentais como agregado miúdo, o quartzito friável, também obtiveram valores menores de densidade no estado endurecido, quando comparado a argamassa desenvolvida com agregado natural.

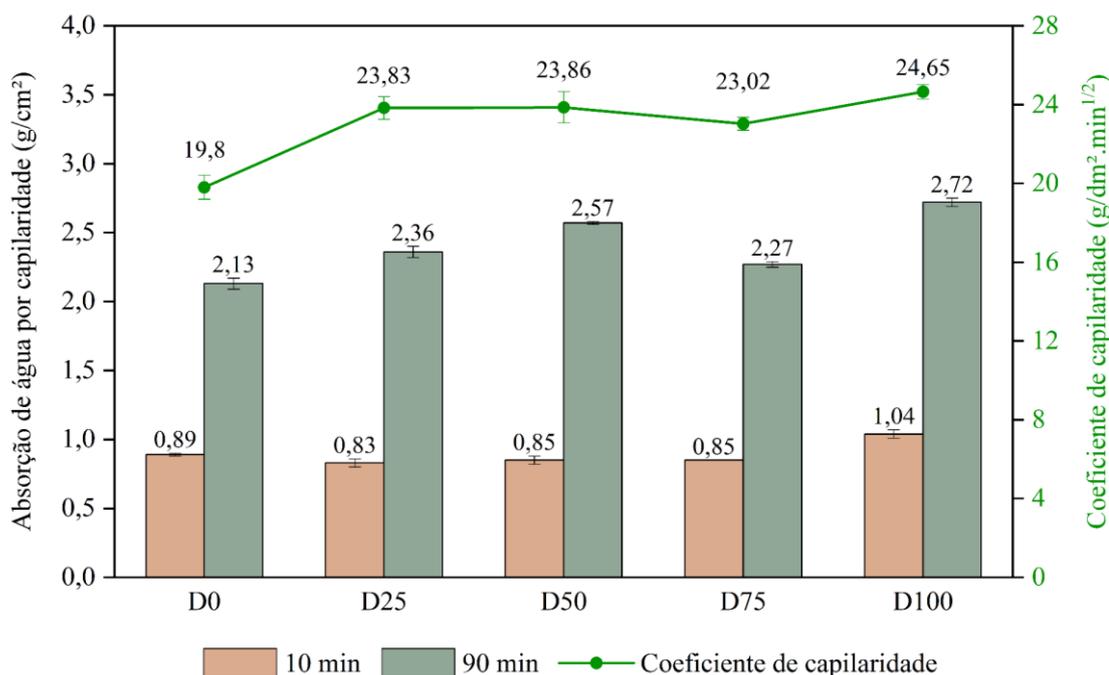
Pode-se, ainda, fazer uma correlação entre a densidade no estado fresco e o índice de consistência, onde argamassas mais densas tendem a se espalhar mais com as quedas da mesa de consistência, que as argamassas mais leves. Essa correlação também foi estudada por Carasek *et al.* (2016) e o comportamento semelhante descrito pelos autores pode ser relacionado com a presente pesquisa, uma vez que a D0 apresentou a maior densidade no estado fresco e o maior espalhamento no índice de consistência. Por outro lado, a D100 apresentou a menor densidade no estado fresco e o menor espalhamento.

A densidade de massa no estado fresco está relacionada com o esforço exercido pelo profissional durante o manuseio e aplicação da argamassa, ou seja, é uma propriedade que impacta diretamente na produtividade em obra. A fim de reduzir o peso das argamassas, comumente são adicionados aditivos químicos ou cales hidratadas. Já a densidade de massa no estado endurecido, quanto menor seu valor, menor o peso próprio das alvenarias, reduzindo as cargas nos elementos estruturais da edificação (CARASEK, 2017). Destaca-se que, com a substituição de AMN por RNS, há redução do peso da argamassa fresca e endurecida, fazendo com que o esforço exercido no assentamento de blocos cerâmicos com argamassas com RNS seja menor, assim como as cargas oriundas das alvenarias na estrutura da edificação.

5.4.4 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas foi realizado com o objetivo de analisar o transporte de líquido no interior da matriz por meio da sucção capilar, onde, indiretamente, avalia-se a porosidade do material. A Figura 21 apresenta os resultados obtidos de absorção de água.

Figura 21 – Absorção de água por capilaridade das argamassas no tempo de 10 e 90 min.



Fonte: Autora (2024).

Diante dos dados expostos, verifica-se que as argamassas apresentaram uma absorção de água por capilaridade semelhante para o tempo de 10 min, sendo o maior valor observado para a D100. Nota-se no tempo de 90 min, uma leve tendência de aumento da absorção com o acréscimo de RNS, com exceção da D75 que apresentou um valor inferior. Inclusive, constata-se um aumento da absorção de água da D100 quando comparado com a D0, de quase 28 % para o tempo de 90 min. O coeficiente de capilaridade, definido como a diferença de massa do corpo de prova nos tempos de 10 e 90 min, apresentou um comportamento semelhante ao da absorção no tempo de 90 min. Os coeficientes observados variam de 19,80 a 24,65 g/dm².min^{1/2}, sendo o menor valor constatado para a D0 e o maior valor para a D100.

A tendência ao aumento da absorção de água por capilaridade com o acréscimo de RNS nas argamassas pode estar relacionada com o menor empacotamento das partículas do resíduo (PETRY, 2015). Esse menor empacotamento, conforme já comentado, acarretou em uma maior quantidade de vazios nas dosagens (verificado nos resultados do ensaio de teor de ar) e, por consequência, esses vazios possivelmente provocaram o aumento da absorção de água por meio da sucção capilar, constatado à medida em que se adicionou RNS nas argamassas.

Os resultados obtidos foram superiores aos encontrados por Medeiros *et al.* (2019), que desenvolveram argamassas com o traço de 1:2:9 substituindo integralmente o agregado miúdo natural por resíduo da mineração de scheelita. Os autores encontraram uma absorção de

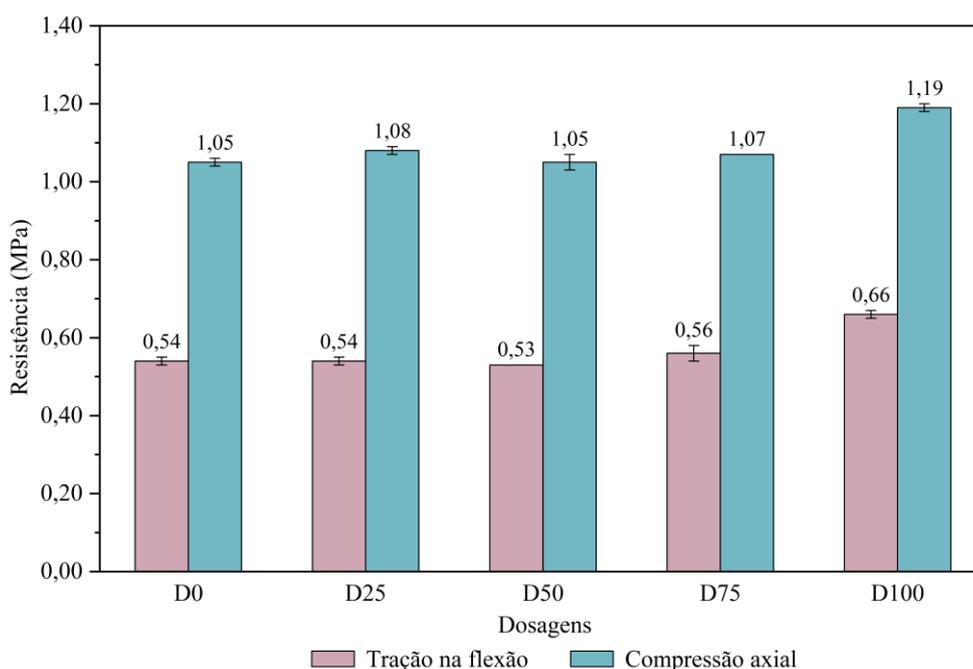
água de 0,14 g/cm² para o tempo de 10 min e de 0,36 g/cm² para o tempo de 90 min e, por consequência, obtiveram um coeficiente de capilaridade inferior, de 7,55 g/dm².min^{1/2}. Stolz (2015), por sua vez, utilizando três diferentes composições granulométricas de agregados naturais para argamassas com o traço de 1:2:9, obteve valores de coeficiente de capilaridade semelhantes ao desta pesquisa, variando entre 20 a 26 g/dm².min^{1/2}.

Uma das principais formas de acesso de substâncias agressivas em um material cimentício é por meio da absorção de água (BRANCO *et al.*, 2021). Por esse motivo, a partir do ensaio de absorção de água por capilaridade avalia-se indiretamente a porosidade e, por consequência, a durabilidade da argamassa. No entanto, na literatura técnica e científica, não existe um limite máximo estabelecido para o comprometimento do desempenho global de uma argamassa. Por fim, ressalta-se, que o acréscimo de RNS não conduz a valores muito superiores de absorção de água, indicando viabilidade técnica da utilização do RNS em argamassas.

5.4.5 Resistência à tração na flexão e à compressão

Observa-se na Figura 22 a determinação da resistência mecânica à tração na flexão e à compressão realizadas com o objetivo de verificar a tensão máxima que as argamassas desenvolvidas podem resistir quando submetidas a estas cargas, após a cura ao ar por 28 dias.

Figura 22 – Resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas após a cura ao ar por 28 dias.



Fonte: Autora (2024).

Verifica-se que as dosagens D0, D25, D50 e D75 exibiram valores semelhantes, tanto para a resistência à tração na flexão, quanto para a resistência à compressão, com valores variando de 0,53 a 0,56 MPa e 1,05 a 1,08 MPa, respectivamente. A D100, por sua vez, exibiu um sutil aumento para ambas as resistências, chegando a 0,66 MPa (tração na flexão) e 1,19 MPa (compressão). Além disso, todas as dosagens se enquadram na classificação R2 para a resistência à tração, com valores entre 0,50 e 1,50 MPa, conforme limites estabelecidos pela NBR 13281-1 (ABNT, 2023a). Todavia, em relação à resistência à compressão, as dosagens não se enquadram no limite inferior determinado pela NBR 13281-2 (ABNT, 2023b), com valores de 2,00 a 5,00 MPa.

Apesar do RNS apresentar um menor empacotamento das partículas e, conseqüentemente, gerar um maior teor de vazios nas argamassas (conforme ensaio de teor de ar), constatou-se valores semelhantes das resistências mecânicas para todas as dosagens, inclusive um suave incremento das resistências para a D100. Essa situação pode estar relacionada com a superfície rugosa e com o formato anguloso do RNS. Essas características, possivelmente, intensificaram a adesão entre o agregado e a pasta, melhorando a distribuição das tensões dentro da matriz (YAMEIA; LIHUA, 2017; BRITO; KURDA; SILVA, 2018).

Donza, Cabrera e Irassar (2002) e Shen *et al.* (2016) corroboram com essa afirmação relatando que um agregado com uma superfície rugosa, melhora a zona de transição entre a pasta e o agregado, aumenta o intertravamento mecânico e aumenta a força de atrito entre as partículas, proporcionando uma maior resistência mecânica para a matriz. Yameia e Lihua (2017) complementam que misturas preparadas com agregado britado comumente apresentam uma resistência mecânica superior comparada às preparadas com agregado natural.

Os valores da resistência à tração na flexão e à compressão obtidos para todas as dosagens se apresentam ligeiramente superiores ao encontrado por Silva (2006), que encontrou valores de 0,32 MPa e 0,92 MPa, respectivamente. Rocha *et al.* (2008), por sua vez, obtiveram uma resistência à tração próxima ao da presente pesquisa, com um resultado em torno de 0,50 MPa. Já a resistência à compressão exibiu um valor mais expressivo, de 1,90 MPa. Os resultados, de ambos os trabalhos, foram obtidos para argamassas desenvolvidas com agregado miúdo natural e com o traço de 1:2:9.

Uma adequada resistência à tração na flexão, segundo Xu *et al.* (2022), é requerida para argamassas, haja vista que uma baixa resistência torna a mistura vulnerável a fissuras e trincas, devido às tensões impostas sob ela. Neste sentido, as argamassas apresentaram valores de resistência à tração na flexão semelhantes para todos os teores de substituição, inclusive com valores dentro dos limites estabelecidos por norma.

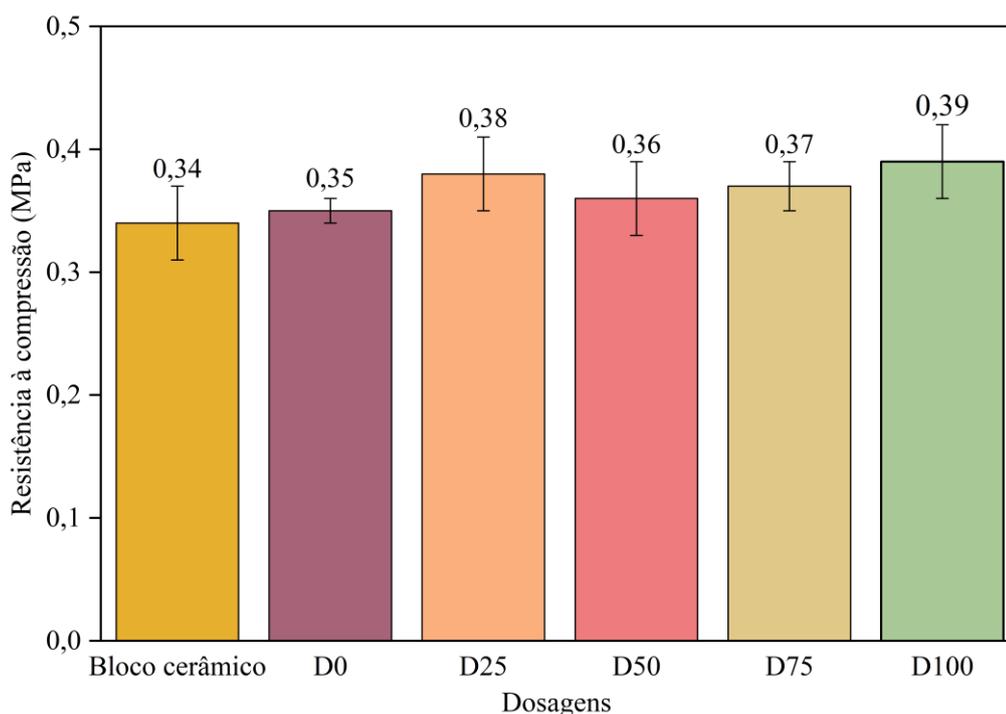
A resistência à compressão, por sua vez, é uma propriedade de extrema importância, pois é a forma na qual a argamassa é solicitada em um sistema de vedação (parede). Uma elevada resistência à compressão, de acordo com Nakakura e Cincotto (2004), torna a mistura muito rígida, podendo ocasionar fissuras. Em contra partida, uma baixa resistência pode provocar a ruptura da alvenaria por esmagamento das juntas.

Desta forma, as argamassas desenvolvidas apresentaram valores de resistência à compressão semelhantes para todos os teores de substituição; no entanto, não atingiram o limite mínimo estabelecido por norma. Sendo assim, com o intuito de evitar rupturas quando utilizadas como juntas, recomenda-se o estudo com um traço mais rico (menor proporção entre cimento e agregado) ou a utilização de aditivos modificadores de viscosidade, com o objetivo de reduzir a relação a/a e, com isso, alcançar uma resistência mecânica superior.

5.4.6 Resistência à compressão de prisma

O ensaio de resistência à compressão de prisma foi realizado com o intuito de analisar o desempenho das argamassas quando utilizadas como juntas na união de alvenaria. Na Figura 23 apresenta-se os resultados da resistência à compressão dos blocos cerâmicos, bem como, da resistência à compressão dos prismas.

Figura 23 – Resistência à compressão dos blocos cerâmicos e dos prismas.



Fonte: Autora (2024).

Constata-se que os blocos cerâmicos exibiram uma resistência à compressão média de 0,34 MPa, não atendendo a exigência da NBR 15270-1 (ABNT, 2005f), que estabelece que blocos cerâmicos de vedação com furos na horizontal devem possuir uma resistência à compressão igual ou superior a 1,50 MPa. Os prismas, por sua vez, apresentaram resistências variando entre 0,35 a 0,39 MPa. Esses valores refletem, apenas, a resistência do bloco cerâmico, haja vista que as rupturas dos prismas, para todas as dosagens, ocorreram nos blocos (Figura 24). Além disso, como também pode ser visualizado, após a conclusão do ensaio, os blocos se mantiveram completamente unidos nas argamassas.

Figura 24 – Imagens destacando o local da ruptura dos prismas:
(a) prismas com a D0; (b) prismas com a D100.



(a)



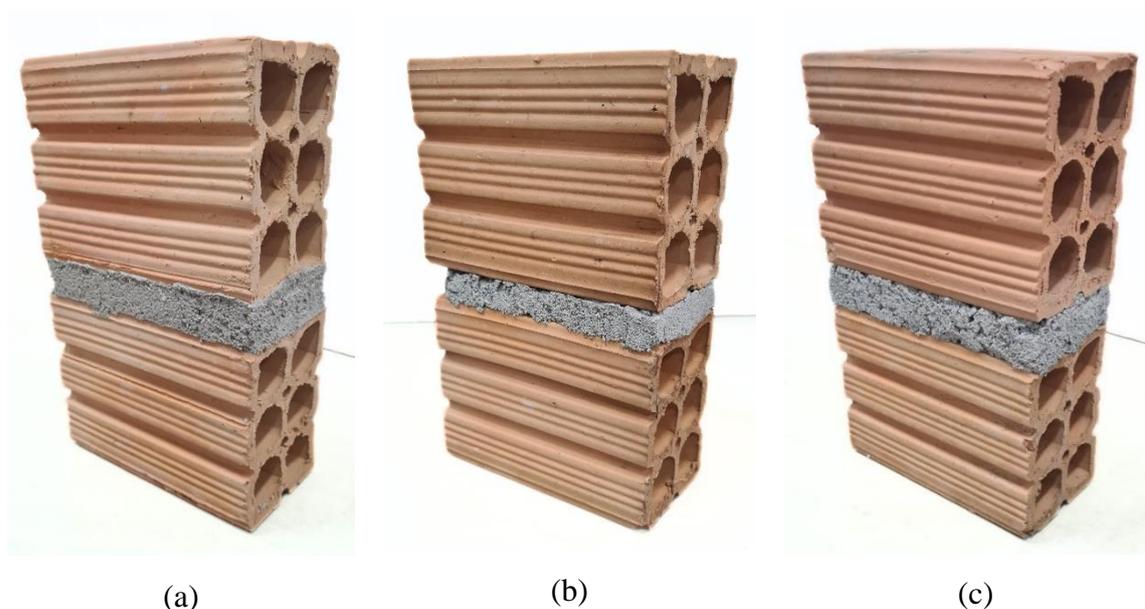
(b)

Fonte: Autora (2024).

Desta forma, considerando que o bloco cerâmico utilizado não possui resistência mecânica suficiente e que, por este motivo, o sistema não se comportou de forma monolítica, não foi possível analisar o desempenho das argamassas como juntas na união de alvenaria de forma quantitativa. Entretanto, qualitativamente, todas as dosagens apresentaram forte aderência entre os blocos (inferiores e superiores) dando indícios da aplicação das argamassas contendo RNS. Blocos cerâmicos de outras empresas também foram investigados apresentando resistência à compressão inferior a mínima estipulada em norma. Portanto, mesmo o bloco utilizado tenha sido escolhido pelo amplo uso na região da pesquisa, sugere-se um estudo com produtos com resistência à compressão adequada, a fim de investigar o desempenho das argamassas desenvolvidas com o RNS.

Adicionalmente, constatou-se, durante a preparação dos prismas com a D75 e a D100, que suas trabalhabilidades prejudicaram a formação das juntas. De forma qualitativa, na Figura 25a pode-se observar que a D0 preencheu completamente a junta entre os blocos, sem falhas ou vazios. Já nas Figura 25b e Figura 25c, constata-se falhas ao longo das juntas das argamassas desenvolvidas com 75 e 100 % de RNS, devido à redução da fluidez das mesmas. Estes resultados observados são consistentes com as reduções das consistências e viscosidades investigadas na análise reológica das argamassas. Inclusive, a observação da Figura 24 também ajuda a evidenciar a diferença do preenchimento das juntas entre a D0 e a D100.

Figura 25 – Imagens revelando as características visuais das juntas dos prismas: (a) prisma com a D0; (b) prisma com a D75; (c) prisma com a D100.



Fonte: Autora (2024).

Diante deste cenário, para a utilização da D75 e da D100 recomenda-se um estudo para a adição de aditivos modificadores de viscosidade nas dosagens, como os plastificantes ou superplastificantes, com o objetivo de aumentar a fluidez da argamassa, facilitar o manuseio, a aplicação e o acabamento e, conseqüentemente, reduzir falhas nas juntas das argamassas desenvolvidas com teores acima de 50 % de RNS.

Com base nos resultados da análise física e mecânica, o acréscimo de RNS conduz a um aumento tênue nas argamassas a partir da caracterização do teor de ar, da retenção de água, da absorção de água por capilaridade e da resistência mecânica. Por outro lado, proporciona uma redução acentuada das densidades de massa, sem afetar a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão das argamassas.

Neste sentido, tendo em vista que qualquer teor de substituição (25, 50, 75 e 100 %) de AMN por RNS, proporciona propriedades adequadas para o bom desempenho das argamassas, considerando como base a argamassa de referência (0 % de RNS), assim como a literatura consultada, indica-se a dosagem D100 como a mais propícia no âmbito físico e mecânico, contribuindo para a valorização do RNS em substituição a 100 % do AMN.

6 CONCLUSÃO

Diante dos resultados alcançados, foi possível avaliar o desempenho de argamassas desenvolvidas com o resíduo da nefelina sienito (RNS) em substituição ao agregado miúdo natural (AMN), a partir do estudo de propriedades reológicas, físicas e mecânicas, nos teores de 0, 25, 50, 75 e 100% de substituição. Verificou-se com sucesso a viabilidade técnica, no âmbito reológico, físico e mecânico da valorização do resíduo como agregado miúdo, sendo o teor de 50 % de substituição considerado o mais promissor.

A partir das análises química, morfológica e física dos agregados, foi possível identificar as potencialidades do RNS e as suas principais diferenças, quando comparado ao AMN. Verificou-se por meio do MEV que o RNS apresenta partículas mais angulosas e irregulares com uma superfície rugosa, enquanto o AMN apresenta partículas predominantemente arredondadas a cúbicas com uma superfície lisa. Além disso, o RNS exibiu maior área de superfície específica (2,41 m²/g) que o AMN (2,03 m²/g), evidenciando que o RNS possui partículas mais finas que o AMN. A distribuição do tamanho de partículas também difere entre os agregados, sendo observada uma distribuição uniforme e com ausência de frações para o RNS, enquanto o AMN apresenta uma distribuição contínua. O RNS ainda possui menor massa unitária (1,34 g/cm³) quando comparado com o AMN (1,52 g/cm³).

Por meio das análises reológicas, foi possível analisar o comportamento no estado fresco das argamassas desenvolvidas com o RNS. Constatou-se que, à medida em que se aumenta o teor de RNS, a trabalhabilidade reduz. Esse fato foi constatado tanto pelo ensaio de índice de consistência, quanto pelo ensaio de reometria rotacional. Observou-se uma redução acentuada do espalhamento da D75 (225 mm) e da D100 (219 mm), comparado ao da D0 (280 mm), bem como o aumento do torque, da viscosidade, do torque de escoamento e da área de histerese com o aumento do teor de RNS nas argamassas. As viscosidades, na velocidade de rotação de interesse de 190,98 rpm, apresentaram valores de 4,99 (D0), 5,96 (D25), 6,96 (D50), 8,07 (D75) e 8,78 Pa.s (D100), confirmando a redução da fluidez com o acréscimo do resíduo.

Adicionalmente, obteve-se também correlações entre os ensaios de índice de consistência e de reometria rotacional. Os resultados demonstraram que o parâmetro de consistência possui forte correlação com o parâmetro de torque ($R^2 = 0,9208$) e com o parâmetro de viscosidade ($R^2 = 0,9204$).

Por meio das análises físicas e mecânicas, foi possível analisar o comportamento físico e mecânico das argamassas desenvolvidas com o RNS. Constatou-se que o acréscimo de RNS nas argamassas conduz a um tênue incremento do teor de ar (1 a 5 %), da retenção de água

(88 a 92 %) e da absorção de água por capilaridade (2,00 a 2,75 g/cm²). A densidade de massa, por sua vez, reduz, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. As resistências à tração na flexão e à compressão se mostraram semelhantes para todas as dosagens, com valores entre 0,53 a 0,66 MPa e 1,05 a 1,19 MPa, respectivamente.

Em virtude dos resultados obtidos, é possível concluir que o RNS pode ser utilizado como agregado miúdo para o desenvolvimento de argamassas, sendo a D50 considerada a argamassa mais promissora dentre as estudadas para uso na construção civil, em razão do bom desempenho demonstrado nos ensaios. Acima desse teor, a trabalhabilidade foi reduzida significativamente, interferindo no manuseio e aplicação. No entanto, considerando o bom desempenho da D75 e da D100 nos ensaios físicos e mecânicos, a falta de fluidez apresentada pelas dosagens pode ser contornada com a utilização de aditivos modificadores de viscosidade.

Diante do exposto, acredita-se que esta pesquisa pôde colaborar para o avanço das pesquisas científicas relacionadas às argamassas, principalmente no âmbito da utilização de resíduos de mineração como agregado miúdo e na reologia de argamassas com resíduos. Sobretudo, pôde dispor à comunidade científica dados e informações relevantes sobre o resíduo da nefelina sienito, possibilitando a descoberta de novas aplicações em diferentes áreas.

Por fim, ressalta-se a contribuição social com uma abordagem de pesquisa correlacionada com dois Objetivos de Desenvolvimento Sustentável propostos pela ONU, sendo eles: o uso eficiente dos recursos naturais e a redução substancial da geração de resíduos, uma vez que, com êxito, foi possível aliar a circularidade mineral a partir da valorização do resíduo do beneficiamento da nefelina sienito, à redução do uso de agregado miúdo natural para o desenvolvimento de argamassas de assentamento. Além disso, o resíduo estudado pôde ser utilizado em teores elevados sem prejuízos às propriedades deste tipo de argamassa. Esse fato colabora para a redução da demanda por agregado miúdo natural e, concomitantemente, impulsiona o desenvolvimento sustentável a partir de ações de economia circular.

6.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

De forma a complementar as análises e resultados obtidos nesta pesquisa, são sugeridos os seguintes tópicos para estudos futuros:

- a) Verificar a utilização de aditivos modificadores de viscosidade, como os plastificantes ou superplastificantes, a fim aumentar a fluidez da D75 e da D100;

- b) Investigar um traço mais rico (menor proporção entre cimento e agregado) para todas as argamassas ou o uso de aditivos modificadores de viscosidade, com o objetivo de reduzir a relação a/a e alcançar uma resistência à compressão superior;
- c) Explorar o ensaio de resistência à compressão de prismas utilizando blocos cerâmicos com resistência à compressão adequada, de modo a analisar o desempenho das argamassas quando utilizadas como juntas na união de alvenaria;
- d) Realizar ensaios de aderência, com a finalidade de averiguar a resistência de aderência das argamassas com o substrato;
- e) Determinar o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas, de modo a verificar a rigidez das mesmas;
- f) Realizar ensaios de durabilidade com as argamassas, para analisar seus desempenhos em idades avançadas.

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, L. B.; BORGES, J. G.; SILVA, E. F.; CUPERTINO, D. V. M. R. Análise calorimétrica de pastas de cimento Portland contendo polímero superabsorvente (SAP) e nanopartículas de sílica (NS). **Revista Matéria**, v. 25, n. 4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1160>.

AHN, N.; FOWLER, D. W. **An experimental study on the guidelines for using higher contents of aggregate microfines in Portland cement concrete**. University of Texas, Austin, 2001, 435p.

AMANCIO, F. A.; LIMA, D. A.; DIAS, A. R. O.; MESQUITA, E. F. T.; CABRAL, A. E. B. Propriedades mecânicas de argamassas com substituição da areia natural por escória de aciaria BSSF (baosteel's slag short flow). **Revista Matéria**, v. 25, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0887>.

ARCARO, S. **Síntese, processamento coloidal e sinterização de compósitos nanoestruturados do sistema LZS (Li₂O-ZrO₂-SiO₂) + Al₂O₃**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Florianópolis, 2016.

ARGANE, R.; BENZAAZOUA, M.; HAKKOU, R.; BOUAMRANE, A. A comparative study on the practical use of low sulfide base-metal tailings as aggregates for rendering and masonry mortars, **J. Clean. Prod.**, 112, Part 1, 2016, 914-925. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.004>.

ARNOLD, D. C. M. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas**. 185p. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7175**. Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 7211**. Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro. ABNT, 2022a.

_____. **NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. ABNT, 2019.

_____. **NBR 7225**. Materiais de pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

_____. **NBR 10007**. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

_____. **NBR 13277**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

_____. **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: ABNT, 2005b.

_____. **NBR 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005c.

_____. **NBR 13280**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro: ABNT, 2005d.

_____. **NBR 13281-1**. Argamassas inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaios. Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023a.

_____. **NBR 13281-2**. Argamassas inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaios. Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. Rio de Janeiro: ABNT, 2023b.

_____. **NBR 13529**. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 15259**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2005e.

_____. **NBR 15270-1**. Componentes cerâmicos. Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005f.

_____. **NBR 15270-3**. Componentes cerâmicos. Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2005g.

_____. **NBR 15961-2**. Alvenaria estrutural – Blocos de concreto. Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. **NBR 16541**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

_____. **NBR 16697**. Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro. ABNT, 2018.

_____. **NBR 16887**. Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro. ABNT, 2020.

_____. **NBR 16915**. Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

_____. **NBR 16916**. Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

_____. **NBR 16972**. Agregados — Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c.

_____. **NBR 16973**. Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021d.

_____. **NBR 17054**. Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C-270**: Standard specification for mortar for unit masonry. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

_____. **ASTM C1314 – 23a**. Standard test method for compressive strength of masonry prisms. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023.

_____. **ASTM C1749-17a**. Standard guide for measurement of the rheological properties of hydraulic cementitious paste using a rotational rheometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

_____. **ASTM C1874-20**. Standard test method for measuring rheological properties of cementitious materials using coaxial rotational rheometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

AZEVEDO, A. R. G.; MARVILA, M. T.; BARROSO, L. S.; ZANELATO, E. B.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N. Effect of granite residue incorporation on the behavior of mortars. **Materials**, 12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12091449>.

AZEVEDO, A. R. G.; ALEXANDRE, J.; ZANELATO, E. B.; MARVILA, M. T. **Influence of incorporation of glass waste on the rheological properties of adhesive mortar**. **Constr. Build. Mater.**, 2017, 148, 359–368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.208>.

AÏSSOUN, B. M.; HWANG, S. D.; KHAYAT, K. H. Influence of aggregate characteristics on workability of superworkable concrete. **Mater. Struct.**, 49, 2016, 597–609. DOI: <https://doi.org.ez318.periodicos.capes.gov.br/10.1617/s11527-015-0522-9>.

BANFILL, P. F. G. Use of the ViscoCorder to study the rheology of fresh mortar. **Magazine of Concrete Research**, 42, 1990, p. 213-221. DOI: <https://doi.org/10.1680/mac.1990.42.153.213>.

BANFILL, P. F. G. **Rheology of fresh cement and concrete**. School of the Built Environment, Heriot-Watt University Edinburgh, 1991, p. 61-130. DOI: 10.4324/9780203473290.

BARRETT, P. J. A forma das partículas de rocha, uma revisão crítica. **Sedimentologia**, 27, 1980, 291-303. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1980.tb01179.x>.

BARROS, S. V. A.; MARCIANO, J. E. A.; FERREIRA, H. C.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A. Addition of quartzite residues on mortars: Analysis of the alkali aggregate reaction and the mechanical behavior. **Constr. Build. Mater.**, 118, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.079>.

BARROS, S. V. A.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R. **Durabilidade de argamassas confeccionadas com resíduos de quartzito**. Estudo da viabilidade técnica de agregados oriundos de resíduos do beneficiamento de rochas de quartzito em argamassas. 1. ed. Novas Edições Acadêmicas, v. 1, 2017. 124p.

BEAUDOIN, J.; ODLER, I. Hydration, setting and hardening of Portland cement. In: **Lea's Chem. Cem. Conc.** 5ed. 2019, 157-250. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00005-8>.

BENABED, B.; KADRI, E.; AZZOUZ, L.; KENAI, S. Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. **Cem. Concr. Compos.**, 34, 2012, 1167-1173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.007>.

BENARCHID, Y.; TAHA, Y.; ARGANE, R.; TAGNIT-HAMOU, A.; BENZAAZOUA, M. Concrete containing low-sulphide waste rocks as fine and coarse aggregates: Preliminary assessment of materials, **J. Clean. Prod.**, 221, 2019, 419-429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.227>.

BONAVETTI, V. L.; IRASSAR, E. F. The effect of stone dust content in sand. **Cem. Concr. Res.**, 24, 3, 1994, 580-590. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90147-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90147-3).

BRANCO, F. G.; BELGAS, M. L.; MENDES, C.; PEREIRA, L.; ORTEGA, J. M. Characterization of fresh and durability properties of different lime mortars for being used as masonry coatings in the restoration of ancient constructions. **Sustainability**, 13, 4909, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13094909>.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Estadual – Santa Catarina**. Anos base 2017 e 2018. Brasília: ANM, 2019. 57 p.

BRITO, J.; KURDA, R.; SILVA, P. R. Can we truly predict the compressive strength of concrete without knowing the properties of aggregates? **Appl. Sci.**, 8, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8071095>.

BENTZ, D. P.; FERRARIS, C. F.; GALLER, M. A.; HANSEN, A. S.; GUYNN, J. M. Influence of particle size distributions on yield stress and viscosity of cement–fly ash pastes. **Cem. Concr. Res.**, 42, 2012, p. 404-409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.11.006>.

BETIOLI, A. M. **Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 188, 2007.

CANOVA, J. A.; BERGAMASCO, R.; NETO, G. A. A utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa de revestimento. **Acta Sci. Technol.**, 29, 2, 2007, 141-149. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v29i2.583>.

CARASEK, H. Argamassas. In: **Materiais de Construção e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2ed. G. C. Isaia. São Paulo, IBRACON, 2017, 2v.

CARASEK, H.; ARAÚJO, R. C.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista Matéria**, v.21, n.3, 2016, p. 714 –732. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160003.0068>.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2009, 138p.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cem. Concr. Res.**, 39, 9, 2009, p. 748-753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.05.014>.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G.; BANFILL, P. F. G. Characterisation of rendering mortars by squeeze-flow and rotational rheometry. **Cem. Concr. Res.**, 57, 2014, p. 79–87. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.12.009>.

CARLESSO, D. M. **Avaliação do desempenho do aditivo superplastificante de base policarboxilato pré-tratado por sonicação no comportamento reológico de pastas de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CARNEIRO, A.; CINCOTTO, M. Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, **Boletim Técnico n. 237**. 1999.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características de argamassa. **Ambiente Construído**, v. 1, n. 2, p. 37–44, 1997. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/3354>.

CASALI, J. **Estudo da interação entre a argamassa de assentamento e o bloco de concreto para alvenaria estrutural: transporte de água e aderência**. 348p. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil – Revisão. **Cerâmica**, 57, 2011, 63-75. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132011000100009>.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000100003>.

CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. A.; JOHN, V. M. **Cal na construção civil**. In.: ISAIA, G.C. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*, 3ª ed, v. 2, São Paulo: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2017.

DANTAS, S. R. A.; LIMA, F. J. N. de; ROMANO, R. C. de O.; PILEGGI, R.; LOH, K. Evaluation of rheological properties of mortar with TiO₂ addition. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 7-21, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000400556>.

DE SCHUTTER, G.; POPPE, A. M. Quantification of the water demand of sand in mortar. *Constr. Build. Mater.*, 18, 2004, p. 517–521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.004>.

DINGER, D. R. **Characterization techniques for ceramists**. Clemson University: Dennis Dinger, 2005, 270p. ISBN 0971569665.

DONZA, H.; CABRERA, O.; IRASSAR, E. F. High-strength concrete with different fine aggregate. **Cem. Concr. Res.**, 32, 11, 2002, 1755-1761. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00860-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00860-8).

DU, L.; FOLLIARD, K. J. Mechanisms of air entrainment in concrete. **Cem. Concr. Res.**, 35, 8, 2005, 1463-1471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.026>.

EDWARDS, B. The insatiable demand for sand. **Finance & Development**. 2015. Disponível em: <https://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/2015/12/pdf/edwards.pdf>. Acesso em: 01/11/2022.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M.; BEJA, I. A. Agregados para a Construção Civil. In: **Materiais de Construção e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2ed. G. C. Isaia. 3ª ed. São Paulo, IBRACON, 2017, 1v.

FAROKHZAD, R.; MAHDIKHANI, M.; BAGHERI, A.; BAGHDADI, J. Representing a logical grading zone for self-consolidating concrete. **Constr. Build. Mater.**, 115, 2016, 735-745. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.006>.

FERREIRA, E. E.; BRANDÃO, P. R. G.; KLEIN, B.; PERES, A. E. C. Reologia de suspensões minerais: uma revisão. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, 58, 2005, p. 83-87. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672005000100014>.

FILOMENO, O. L. **Caracterização das argamassas de assentamento empregadas na região de Florianópolis e estudo comparativo entre argamassas de assentamento de cimento e cal e cimento e saibro**. 97p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.

FRANÇA, M. S.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Avaliação do comportamento de mistura de argamassas através de reometria rotacional. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 165-174, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000200011>.

FRANÇA, S. C. A.; SAMPAIO, J. A. Obtenção de feldspato a partir de finos de pedreira de nefelina sienito e utilização como insumo para a indústria cerâmica. **CETEM, XIX ENTMME**, Pernambuco, 2002, p. 651-656.

FROTTE, C.; NÚBILA, C. S. A. D.; NAGALLI, A.; MAZER, W.; MACIOSKI, G.; OLIVEIRA, L. O. S. Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. **Revista Matéria**, v. 22, n. 2, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170002.0143>.

FONTES, W.; MENDES, J.; SILVA, S.; PEIXOTO, R. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. **Constr. Build. Mater.**, 112, p. 988–995, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.027>.

FORMOSA, J.; CHIMENOS J. M.; LACASTA, A. M.; HAURIE, L.; ROSELL, J. R. Novel fire-protecting mortars formulated with magnesium by-products. **Cem. Concr. Res.**, v. 41, n. 2, p. 191-196, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.009>.

GARTNER, E. M.; YOUNG, J. F.; DAMIDOT, D. A.; JAWED, I. Hydration of Portland Cement. In: **Structure and Performance of Cements**, 2ed., 2001, 57-113.

GAVRILETEA, M. D. Environmental impacts of sand exploitation. Analysis of Sand Market. **Sustainability**. 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9071118>.

GAWLICKI, M.; NOCUŃ-WCZELIK, W.; BAŃ, Ł. Calorimetry in the studies of cement hydration: Setting and hardening of Portland cement–calcium aluminate cement mixtures. **J. Therm. Anal. Calorim.**, 2010, 100, p. 571–576. DOI: [https://doi-org.ez318.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10973-009-0158-5](https://doi.org.ez318.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10973-009-0158-5).

GEDAM, V.V.; RAUT, R. D.; JABBOUR, A. B. L.S.; AGRAWAL, N. Moving the circular economy forward in the mining industry: challenges to closed-loop in an emerging economy. **Resour. Policy**, 74, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102279>.

GIORDANI, C. **Influência da cal hidratada no comportamento de argamassas mistas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

GIORDANI, C.; MASUERO, A. B. Blended mortars: Influence of the constituents and proportioning in the fresh state. **Constr. Build. Mater.**, 210, 2019, 574-587. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.077>.

GUPTA, S.; KASHANI, A.; MAHMOOD, A. H. Carbon sequestration in engineered lightweight foamed mortar – Effect on rheology, mechanical and durability properties. **Constr. Build. Mater.**, 322, 2022, 126383. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126383>.

GUREVICH, B.I.; KALINKINA, E.V.; KALINKIN, A. M. Binding properties of mechanically activated nepheline containing mining waste. **Minerals**, review, 10, 2020, p. 48-65. DOI: <https://doi.org/10.3390/min10010048>.

HE, X.; FANG, Y.; PENG, Y.; SHEN, W.; QIAO, D.; WANG, M. Mortar's rheological property and workability investigation based on morphology impact factor for graded sand particles. **Constr. Build. Mater.**, 328, 2022, 126987. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126987>.

HOFFMANN, L. **Efeitos da adição de materiais pulverulentos proveniente da britagem de rochas na resistência de concretos convencionais**. 125p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Curitiba, 2015.

HOPPE, J. F.; CARDOSO, F. A.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Técnicas de caracterização reológica de argamassas. **Concreto & Construções**, v. 34, n. 47, p. 108-124, 2007.

ISAIA, G. C. A água no concreto. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. G. C. Isaia. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 1v, p. 311-346.

JAMKAR, S. S.; RAO, C. B. K. Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning. **Cem. Concr. Res.**, 34, 2004, 2021-2027. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.010>.

JIANG, J.; CHEN, S.; JIN, C.; WANG, G.; LIU, T.; XU, T.; LEI, L.; DANG, W.; YANG, X.; DING, T.; LI, Z.; LU, Z.; LI, J. Preparation and properties of high-strength lightweight aggregate ceramsite from nepheline tailings. **Constr. Build. Mater.**, 2023, v. 368, p. 130458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130458>.

KATZ-LAVIGNE, S.; PANDEY, S.; SUYKENS, B. **Mapping Global Sand: Extraction, research and policy options**. 2022. Disponível em: https://www.gicnetwork.be/wp-content/uploads/2022/05/02_Mapping-Global-Sand_WEB-3.pdf. Acesso em: 08/11/2022.

KAWATRA, S. K.; BAKSHI, A. K. On-line measurement of viscosity and determination of flow types for mineral suspensions. **International Journal of Mineral Processing**, 47, 1996, 275-283. DOI [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(96\)00009-9](https://doi.org/10.1016/0301-7516(96)00009-9).

KINNUNEN, P.; ISMAILOV, A.; SOLISMAA, S.; SREENIVASAN, H.; RAISANEN, M.; LEVANEN, E.; ILLIKAINEN, M. Recycling mine tailings in chemically bonded ceramics – A review. **J. Clean. Prod.**, 174, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.280>.

KISMI, M.; SAINT-ARROMAN, J.; MOUNANGA, P. Minimizing water dosage of superplasticized mortars and concretes for a given consistency. **Constr. Build. Mater.**, 28, 2012, p. 747-758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.056>.

KOEHLER, E. P.; FOWLER, D. W. **Summary of concrete workability test methods**. ICAR Report 105.1 International Center of Aggregates Research, Austin, 2003.

KOEHNKEN, L.; RINTOUL, M.; GOICHOT, M.; TICKNER, D.; LOFTUS, A.; ACREMAN, M. C. Impacts of riverine sand mining on freshwater ecosystems: A review of the scientific evidence and guidance for future research. **River Research and Applications**. 2020. DOI: <https://doi-org.ez318.periodicos.capes.gov.br/10.1002/rra.3586>.

KOEHNKEN, L.; RINTOUL, M. **Impacts of sand mining on ecosystem structure, process and biodiversity in rivers**. WWF. 2018. Disponível em: https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/sand_mining_impacts_on_world_rivers_final_.pdf. Acesso em: 06/11/2022.

KOLALA, C.; UMAR, B. B. National benefits, local costs? Local residents' views on environmental and social effects of large-scale mining in Chingola, Zambia. **Natural Resources Forum**, 43, 2019, 205–217. DOI: <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12182>.

KOSTRZANOWSKA-SIEDLARZ, A. Statistical methods for determining rheological parameters of mortars modified with multi-walled carbon nanotubes. **Constr. Build. Mater.**, 253, 2020, 119213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119213>.

KRUGER, P.; KOSSUTE, A. F.; CHINELATTO, A. S. A.; PEREIRA, E. Influência do teor de material pulverulento (<75 µm) do agregado miúdo de resíduos de construção e demolição em argamassas de cimento Portland. **Cerâmica**, 66, 2020, p. 507-515. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132020663802976>.

KUDO, E. K. **Caracterização reológica de argamassas colantes**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2012.

LI, T.; NOGUEIRA, R.; BRITO, J.; LIU, J. Underlying mechanisms of the influence of fine aggregates' content and properties on mortar's plastic viscosity. **J. Build. Eng.**, 67, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106016>.

LONDERO, C.; LENZ, L. A.; SANTOS, Í. M. R.; KLEIN, N. S. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. **Cerâmica**, 63, 2017, 22-33. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633652018>.

LOPES, H. M. T.; PEÇANHA, A. C. C.; CASTRO, A. L. Considerações sobre a eficiência demisturas de concreto de cimento Portland com base no conceito de empacotamento de partículas. **Revista Matéria**, 25, 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0874>.

MAKAR, J. M.; CHAN, G. W.; ESSEGHAIER, K.Y. A peak in the hydration reaction at the end of the cement induction period. **J. Mater. Sci.**, 42, 1388–1392, 2007. DOI: <https://doi.org.ez318.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10853-006-1427-3>

MARVILA, M. T.; ALEXANDRE, J.; AZEVEDO, A. R. G.; ZANELATO, E. B. Evaluation of the use of marble waste in hydrated lime cement mortar based. **J. Mater. Cycles Waste Manag.**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00878-6>.

MARTÍNEZ, I.; ETXEBERRIA, M.; PAVÓN, E.; DÍAZ, N. A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. **Constr. Build. Mater.**, 49, 2013, 384–392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.049>.

MATTAMANA, B. A.; VARGHESE, S.; KICHU, P. River sand inflow assessment and optimal sand mining policy development. **International Journal of Emergency Technology and Advanced Engineering**. 2013.

MAYER, F.; BHANDARI, R.; GÄTH, S. Critical review on life cycle assessment of conventional and innovative waste-to-energy technologies. **Sci. Total Environ.**, 672, 2019, 708–721. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.449>.

McLEMORE, V. T. Nepheline Syenite. In: **Industrial Minerals & Rocks – Commodities, markets and uses**, 7th edition, Editors: Kogel JE, Trivedi N., Barker, JM & Krukowski ST, Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., 2009, 1568p.

MEDEIROS, B. A.; NEVES, G. A.; BARBOSA, N. P.; MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. C. Mechanical properties of mortar produced with the replacement of natural sand by scheelite residue. **Cerâmica**, 65, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752571>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**. Microestrutura, Propriedades e Materiais. Hasparyk. 2 ed. São Paulo, IBRACON, 2014, 782p.

MENDES, J. C.; BARRETO, R. R.; CASTRO, A. S. S.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F. Factors affecting the specific heat of conventional and residue-based mortars. **Constr. Build. Mater.**, 237, 2020a, 117597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117597>.

MENDES, J. C.; BARRETO R. R.; VILAÇA, V. F.; LOPES, A. V.; SOUZA, H. A.; PEIXOTO, R. A. F. Coating mortars based on mining and industrial residues. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 22, 2020b, p. 1569-1586. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01051-0>.

MENDES, B. S.; BORJA, E. V. Estudo experimental das propriedades físicas de argamassas com adição de resíduos de cerâmicas vermelhas recicladas. **Holos**, Ano 23, Vol. 3. 2007. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2007.127>.

MOOSBERG-BUSTNES, H.; LAGERBLAD, B; FORSSBERG, E. The function of fillers in concrete. **Mat. Struct.**, 37, 2004, 74–81. DOI: [https://doi-org.ez318.periodicos.capes.gov.br/10.1007/BF02486602](https://doi.org.ez318.periodicos.capes.gov.br/10.1007/BF02486602).

MÜLLER, A. A. **Estudo do efeito de aditivos na estabilização de argamassas com pós finos de subprodutos industriais**. Tese (Doutorado) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Criciúma, 2023.

NALON, G. H.; ALVES, M. A.; PEDROTI, L. T.; RIBEIRO, J. C. L.; FERNANDES, W. E. H.; OLIVEIRA, D. S. Compressive strength, dynamic, and static modulus of cement-lime laying mortars obtained from samples of various geometries. **J. Build. Eng.**, 44, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102626>.

NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo: EPUSP, 2004.

NASCIMENTO, A. S.; SANTOS, C. P.; MELO, F. M. C.; OLIVEIRA, V. G. A.; OLIVEIRA, R. M. P. B.; MACEDO, Z. S.; OLIVEIRA, H. A. Production of plaster mortar with incorporation of granite cutting wastes. **J. Clean. Prod.**, 265, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121808>.

NEDELJKOVIĆ, M.; VISSER, J.; ŠAVIJA, B.; VALCKE, S.; SCHLANGEN, E. Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. **J. Build. Eng.**, 38, 2021, 102196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102196>.

NETO, M. L. Q.; MEDEIROS, M. K. S.; FLORÊNCIO, F. D. C.; JÚNIOR, L. S. J. **Uso de resíduos da mineração de scheelita em argamassas de assentamento e revestimento**. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais. VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016, 888p.

NSAMBU, R. **Avaliação do desempenho de argamassas de reparação para betão armado**. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico.**

Fazendo Arte Editorial, 2000. 195 p.

ORTEGA, F. S.; PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A.; SOUZA, D. P. F. Aspectos da reologia e da estabilidade de suspensões cerâmicas. Parte I: Fundamentos. **Cerâmica**, 1997.

PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C.; PAIVA, A.; GALLO, J. A Novel Rheometer for Refractory Castables. **American Ceramic Society Bulletin**, 79, 2000, p. 54-58.

PAIVA, H. M. de. **Caracterização reológica de argamassas.** Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro, Aveiro, 2005.

PETRY, N. S. **Uso de resíduos de ágata como agregado em argamassas de cimento Portland branco.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

PŘIKRYL, R.; TÖRÖK, Á., GÓMEZ-HERAS, M., MISKOVSKY, K.; THEODORIDOU, M. Geomaterials in construction and their sustainability: understanding their role in modern society. In: Sustainable Use of Traditional Geomaterials in Construction Practice. **Geological Society**, 416, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1144/SP416.21>.

PRUDÊNCIO JR., L. R.; OLIVEIRA, A. L.; BEDIN, C. A. **Alvenaria estrutural de blocos de concreto.** Florianópolis, 2002, 208 p.

QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ÂNGULO, S. C.; GUILGE, M. S.; CAVANI, G. DE R.; CASTRO, A. L. DE.; CINCOTTO, M. A. Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes. **Ambiente Construído**, 9, 2009, 175–187. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212009000400526>.

RANA, A.; KALLA, P.; VERMA, H. K.; MOHNOT, J. K. Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. **J. Clean. Prod.**, 135, 2016, 312-331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.126>.

RAUPP-PEREIRA, F.; BALL, R. J.; ROCHA, J.; LABRINCHA, J. A.; ALLEN, G. C. New waste based clinkers: Belite and lime formulations. **Cem. Concr. Res.**, 38, 2008, 511–521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.008>.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo Argamassa**. 2ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2012, 188p. ISBN 978-85-397-0254-1. Disponível em: <https://document.onl/documents/conhecendo-argamassa-fernando-antonio-piazza-recena.html?page=1>.

REDDY, B. V. V.; GUPTA, A. Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil–cement block masonry. **Constr. Build. Mater.**, 22, 2008, 1614–1623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.014>.

REN, Q.; TAO, Y.; JIAO, D.; JIANG, Z.; YE, G.; SCHUTTER, G. Plastic viscosity of cement mortar with manufactured sand as influenced by geometric features and particle size. **Cem. Concr. Compos.**, 122, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104163>.

RENTIER, E. S.; CAMMERAAT, L. H. The environmental impacts of river sand mining. **Sci. Total Environ.**, 838, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155877>

RISSANEN, J.; OHENOJA, K.; KINNUMEN, P.; ROMAGNOLI, M.; ILLIKAINEN, M. Milling of peat-wood fly ash: Effect on water demand of mortar and rheology of cement paste. **Constr. Build. Mater.**, 2018, 180, 143–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.014>.

ROCHA, A. K. A.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C.; MELO, W. A. Argamassas mistas para alvenaria utilizando resíduo de caulim - Parte I: comportamento mecânico. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, 61, 2008, 505-512. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672008000400016>.

ROUSSEL, N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. **Cem. Concr. Res.**, v. 36, 2006, p. 1797–1806. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.025>.

SABBATINI, F. H. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente**.

Boletim técnico - Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, 1986.

SALEM, A.; JAZAYERI, S. H.; RASTELLI, E.; TIMELLINI, G. Dilatometric study of shrinkage during sintering process for porcelain stoneware body in presence of nepheline syenite. **Journal of Materials Processing Technology**, 2009, 209, p. 1240-1246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.033>.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. Nefelina Sienito. In: **Rochas & Minerais Industriais: Usos e especificações**. Ed. Adão Benvindo da Luz e Fernando Antonio Freitas Lins. CETEM, 2ª ed., Rio de Janeiro, 2008.

SANTOS, D. H. **Substituição total do agregado natural por quartzito friável para produção de argamassas mistas de assentamento e revestimento**. 128p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 2015.

SANTOS, D. O. J.; FONTES, C. M. A.; LIMA, P. R. L. Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal. **Revista Matéria**, v. 22, n. 1, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0133>.

SBRIGHI NETO, C. Agregados naturais, britados e artificiais para concretos. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. G. C. Isaia. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 1v, p. 233-260.

SCIENCE DIRECT. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 27/11/2023.

SEABRA, M. P.; LABRINCHA, J. A.; FERREIRA, V. M. Rheological behaviour of hydraulic lime-based mortars. **Journal of the European Ceramic Society**, 27, 2007, p. 1735–1741. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.155>.

SHEN, W.; YANG, Z.; CAO, L.; CAO, L.; LIU, Y.; YANG, H.; LU, Z.; BAI, J. Characterization of manufactured sand: Particle shape, surface texture and behavior in concrete. **Constr. Build. Mater.**, 114, 2016, 595-601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.201>.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SILVA, C. M.; JÚNIOR, T. L. S.; JÚNIOR, I. M. P. Caracterização reológica de fluidos não newtonianos e sua aplicabilidade na indústria. **Ciências exatas e tecnológicas**, v. 5, n. 2, P. 285-300, 2019.

SILVA, S. E. H.; ARNOLD, D. C. M.; ORTOLAN, V. K.; NADALON, J. E. A. Estudo do comportamento físico da substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de arenito Botucatu em concreto estrutural. **Revista Matéria**, v. 26, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1320>.

SILVA, R. P.; BARROS, M. M. S. M.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, dropping ball e squeeze flow. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2005.

SONG, Y.; ZHANG, H. Research on sustainability of building materials. **Materials Science and Engineering**, 452, 2018, p. 1-5. DOI: 10.1088/1757-899X/452/2/022169.

SOUSA, J. G. G.; BAUER, E. **Estudo da reologia das argamassas de revestimento no estado fresco**. Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, CBECIMAT, 2002.

SOUSA, J. G. G.; LARA, P. L. O. **Reologia e Trabalhabilidade das Argamassas**. In: Revestimentos de Argamassa: Características e Peculiaridades. Coordenador: Elton Bauer. 2005, p. 23-29.

STOLZ, C. M. **Análise dos principais parâmetros que influenciam na área de contato substrato/argamassa de revestimento**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

STOLZ, C. M.; MASUERO, A. B. Influence of grains distribution on the rheological behavior of mortars. **Constr. Build. Mater.**, 177, 2018, 261-271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.131>.

SVERDRUP, H. U.; KODA, D.; SCHLYTER, P. A simple system dynamics model for the global production rate of sand, gravel, crushed rock and stone, market prices and long-term supply embedded into the WORLD6 model. **Biophys Econ Resour Qual**. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41247-017-0023-2>.

TAYEBI-KHORAMI, M.; EDRAKI, M.; CORDERE, G.; GOLEV, A. Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations. **Minerals**, 9, 286, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9050286>.

TOKARSKI, R. B.; MATOSKI, A.; CECHIN, L.; WEBER, A. M. Comportamento das argamassas de revestimento no estado fresco, compostas com areia de britagem de rocha calcária e areia natural. **Revista Matéria**, v. 23, n. 3, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0530>.

UNITED NATIONS. **The 17 Sustainable Development Goals (SDGs)**. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 12/11/2022.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Sand, rarer than one thinks**. 2014. UNEP Global Environmental Alert Service, Nairobi: UNEP. Disponível em: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8665/GEAS_Mar2014_Sand_Mining.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: 06/11/2022.

VILAÇA, A. S. I.; SIMÃO, L.; MONTEDO, O. R. K.; OLIVEIRA, A. P. N.; RAUPP-PEREIRA, F. Waste valorization of iron ore tailings in Brazil: Assessment metrics from a circular economy perspective. **Resour. Policy**, 75, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102477>.

VITA, M. O. **Estudo da retração plástica e da fissuração do concreto auto-adensável nas primeiras idades: avaliação da influência dos tipos de adições minerais**, Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2011.

VOLKMANN, A. R. **Estudos de rotas de beneficiamento da nefelina sienito para aplicação como fundente na massa cerâmica do porcelanato**. Dissertação (Mestrado), Engenharia de Minas e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

WANG, S.; ZHANG, G.; WANG, Z.; HUANG, T.; WANG, P. Evolutions in the properties and microstructure of cement mortars containing hydroxyethyl methyl cellulose after controlling the air content, **Cem. Concr. Compos.**, 129, 2022, 104487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104487>.

WESTERHOLM, M.; LAGERBLAD, B.; SILFWERBRAND, J.; FORSSBERG, E. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. **Cement & Concrete Composites**, 30, 2008, 274–282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.008>.

XU, Z.; ZHU, Z.; ZHAO, Y.; GUO, Z.; CHEN G.; LIU, CHENG.; GAO, J.; CHEN, X. Production of sustainable plastering mortar containing waste clay brick aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, 16, 2022, e01120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01120>.

YAMEIA, H.; LIHUA, W. Effect of particle shape of limestone manufactured sand and natural sand on concrete. **Procedia Engineering**, 210, 2017, 87–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.052>.

YILDIZ, T. D. Waste management costs (WMC) of mining companies in Turkey: can waste recovery help meeting these costs? **Resour. Policy**, 68, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101706>.

ZHANG, G.; WANG, S.; QIU, D.; WANG, B.; WU, X.; WU, M. Investigation on the performance of hydroxyethyl methyl cellulose modified cement mortars with Portland cement-calcium sulfoaluminate cement binders. **Constr. Build. Mater.**, 283, 2021, 122721. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122721>.