

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO, INOVAÇÃO E EXTENSÃO - PROPIEX**

**DIEGO HALTIERY DOS SANTOS**

**VALORIZAÇÃO DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DA NEFELINA SIENITO**  
**COMO INSUMO MINERAL PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL E AGRICULTURA**

**CRICIÚMA**  
**2024**

**DIEGO HALTIERY DOS SANTOS**

**VALORIZAÇÃO DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DA NEFELINA SIENITO  
COMO INSUMO MINERAL PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL E AGRICULTURA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense, como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira

**CRICIÚMA  
2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S237v Santos, Diego Haltiery dos.

Valorização do resíduo do beneficiamento da nefelina sienito como insumo mineral para a construção civil e agricultura / Diego Haltiery dos Santos. - 2024.

135 p. : il.

Tese (Doutorado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2024.

Orientação: Fabiano Raupp Pereira.

1. Nefelina sienito - Minas e mineração. 2. Resíduos sólidos - Reaproveitamento. 3. Matriz cimentícia. 4. Materiais cimentícios suplementares. 5. Economia circular. I. Título.

CDD 23. ed. 552.3

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101

Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Diego Haltiery dos Santos

Valorização do resíduo do beneficiamento da nefelina sienito como insumo mineral para a construção civil e agricultura

Esta Tese foi julgada adequada à obtenção do grau de Doutor(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, 23 de fevereiro de 2024.

**Banca Examinadora:**

Documento assinado digitalmente



**EDUARDO JUNCA**

Data: 23/02/2024 18:08:40-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Eduardo Junca**

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Documento assinado digitalmente



**OSCAR RUBEM KLEGUES MONTEDO**

Data: 23/02/2024 18:12:03-0300

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: 2024.02.23 18:57:47-03'00'

**Prof. Dr. Manuel Joaquim Peixoto Marques Ribeiro**

Instituto Politécnico de Viana do Castelo- IPVC

Assinado por: **Aires Fernando Fernandes Leite Camões de Azevedo**

Num. de Identificação: 07345364

Data: 2024.02.23 23:16:17+00'00'

**Prof. Dr. Aires Fernando Fernandes Leite Camões de Azevedo**

Universidade do Minho - UMinho

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por sempre guiar o meu caminho, orientar minhas decisões e por conceder saúde e força para seguir em frente em minha jornada.

À Laura, minha esposa, por todo o seu apoio, correções, contribuições, auxílio nos ensaios e por ser para mim um exemplo de foco e determinação, me inspirando a sempre ir além. Te amo.

Ao meu orientador Prof. Fabiano, por garantir que nada faltasse ao desenvolvimento desta tese seja com as correções, orientações, contribuições, arguições ou mesmo suporte financeiro. Muito obrigado.

Aos membros da banca avaliadora, professores Manuel Ribeiro, Aires Azevedo, Eduardo Junca e Oscar Montedo, pela disponibilidade e contribuições.

À Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) e ao Instituto Federal de Santa Catarina campus Criciúma (IFSC-Criciúma) pela infraestrutura dos laboratórios e equipamentos para realização dos ensaios e desenvolvimento da tese.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) da UNESC, a todos os professores que contribuíram com esta caminhada e também a Vivian pelo auxílio prestado.

Aos laboratórios CerTec/UNESC, em especial aos professores Oscar e Sabrina, ao LabValora/UNESC, em especial ao Fábio e Mariani e ao Laboratório de Materiais de Construção/IFSC, em especial aos técnicos Lucas R. e Lucas F. e aos professores Anderson e Cleidson, pela disponibilidade de uso da infraestrutura, colaboração com informações e auxílio na realização de ensaios.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa de Bolsas Universitárias de Santa Catarina (UNIEDU)/FUMDES, pelo apoio financeiro concedido.

Ao Grupo Rio Deserto pelo fornecimento do material e pela oportunidade de estudá-lo. Às empresas Votorantim Cimentos, Camargo Química e Liga Química, pelo fornecimento de insumos e informações.

A todos, que não foram nominalmente citados, mas que de alguma forma deixaram sua parcela de contribuição nessa tese, deixo o meu muito obrigado.

## RESUMO

O atual modelo linear da economia deve dar lugar à modelos econômicos sustentáveis, como o da economia circular. Para isso, torna-se importante que estratégias de valorização de resíduos sejam implementadas. Os estudos que abordam possibilidades para o uso dos resíduos do beneficiamento da nefelina sienito ainda são escassos, deixando uma lacuna científica a ser investigada. Desta forma, este estudo investigou o resíduo da nefelina sienito (RNS), de modo a promover a sua valorização como possíveis formas de insumo mineral. Este resíduo de mineração foi analisado pelos critérios CPQvA, inicialmente em relação a aspectos ambientais (C), características físico-químicas (P), de quantidade/viabilidade (Qv) e posteriormente de aplicabilidade (A). Os resultados indicam a possibilidade para uso do RNS em matrizes cimentícias, sendo classificado como não perigoso; com teor de material fino de 2,75%, massa específica de 2,49 g/cm<sup>3</sup>, massa unitária de 1,34 g/cm<sup>3</sup> e absorção de água de 0,70%; composto majoritariamente sílica (56%), alumina (20%) e álcalis totais (15%); com estrutura cristalina e tendo como principais minerais a nefelina e a albita. O uso do RNS como agregado afetou as propriedades das argamassas e concretos, tanto no estado fresco como no estado endurecido, aumentando o teor de ar, reduzindo a densidade, a trabalhabilidade e também a resistência à compressão. Após ativação mecânico-química, o RNS foi desenvolvido como material cimentício suplementar, onde 90% das partículas se apresentaram inferiores a 16 µm, permanecendo com uma estrutura cristalina e com baixa reatividade, atuando como fíler onde, até 20% de substituição ao cimento, apresentou resistência à compressão similar à dosagem de referência. A segregação seletiva da fração ferrosa foi possível, obtendo o mineral aegirina-augita, de baixo valor econômico. Já a segregação da fração alcalina recuperou 93% do K<sub>2</sub>O na forma de KCl, revelando um uso potencial na agricultura. Deste modo, aplicou-se o conceito base da técnica de valorização de resíduos por meio de diferentes abordagens para a agregação de valor ao material originado no beneficiamento da nefelina sienito, associando estas à circularidade de insumos minerais, ao avanço da economia circular, além da formação de uma simbiose industrial entre os setores da mineração, construção civil e agricultura.

**Palavras-chave:** nefelina sienito, resíduos de mineração, matrizes cimentícias, valorização de resíduos, economia circular.

## ABSTRACT

The current linear model of the economy must give way to sustainable economic models, such as the circular economy. For this, it becomes important to implement waste valorization strategies. Studies addressing possibilities for the use of waste from nepheline syenite beneficiation are still scarce, leaving a scientific gap to be investigated. Thus, this study investigated the nepheline syenite waste (NSW) in order to promote its valorization as possible mineral resources forms. This mining waste was analyzed according to the CPQvA criteria, initially in relation to environmental aspects (C), physicochemical characteristics (P), quantity/viability (Qv), and subsequently applicability (A). The results indicate the possibility of using NSW in cement matrices, being classified as non-hazardous; with a powder material content of 2.75%, specific gravity of 2.49 g/cm<sup>3</sup>, bulk density of 1.34 g/cm<sup>3</sup>, and water absorption of 0.70%; composed mainly of silica (56%), alumina (20%), and total alkalis (15%); with a crystalline structure and having nepheline and albite as the main minerals. The use of NSW as an aggregate affected the properties of mortars and concretes, both in the fresh and hardened states, increasing air content, reducing density, workability, and also compressive strength. After mechanical-chemical activation, NSW was developed as supplementary cementitious material, where 90% of particles were found to be below 16 µm, remaining with a crystalline structure and low reactivity, acting as a filler where, up to 20% substitution for cement, it showed compressive strength similar to the reference dosage. Selective segregation of the ferrous fraction was possible, obtaining aegirine-augite, of low economic value. The segregation of the alkaline fraction recovered 93% of K<sub>2</sub>O in the form of KCl, revealing potential use in agriculture. Thus, the basic concept of waste valorization technique was applied through different approaches to add value to the material originated from nepheline syenite beneficiation, associating these with mineral resources circularity, the advancement of the circular economy, and the formation of an industrial symbiosis among the mining, construction, and agriculture sectors.

**Key-words:** nepheline syenite, mining wastes, cementitious matrices, waste valorization, circular economy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Publicações relacionadas com o tema da tese nos últimos 5 anos. ....	18
Figura 2 – Diagrama ternário para formação de rochas alcalinas.....	35
Figura 3 – Fluxograma do processo de beneficiamento da nefelina sienito.....	39
Figura 4 – Representação da separação magnética com ímã permanente. ....	40
Figura 5 – Sistema de separação de partículas por aeroclassificador. ....	41
Figura 6 – Representação em <i>loop</i> para o conceito de economia circular.....	44
Figura 7 – Imagens dos materiais utilizados como agregados AMN, AGN e ARNS. ....	48
Figura 8 – Planejamento experimental utilizando os critérios CPQvA. ....	50
Figura 9 – Imagens dos diferentes aspectos dos concretos avaliados. ....	61
Figura 10 – Fluxograma representativo para a classificação ambiental do RNS. ....	70
Figura 11 – Curvas granulométricas dos agregados AMN, ARNS e AGN. ....	73
Figura 12 – DRX do mineral NS e do RNS.....	77
Figura 13 – Morfologia por MEV das partículas do AMN e do ARNS. ....	78
Figura 14 – Variações dimensionais das argamassas em cura ao ar e em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	79
Figura 15 – Aspecto das argamassas após 182 dias de cura em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	81
Figura 16 – Detalhes da expansibilidade da argamassa com o ARNS em Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	82
Figura 17 – Localização das principais jazidas da nefelina sienito: no mundo (verde), no Brasil (azul) e no estado de Santa Catarina (amarelo). ....	83
Figura 18 – Imagens dos corpos de prova das argamassas aos 28 dias. ....	88
Figura 19 – Densidades de massa e teor de ar das argamassas desenvolvidas.....	89
Figura 20 – Resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas. ....	91
Figura 21 – Imagens da microscopia das argamassas aos 28 dias.....	93
Figura 22 – Curvas de dosagem dos concretos pelo método IPT/EPUSP. ....	95
Figura 23 - Parâmetros obtidos das curvas para dosagem dos concretos. ....	96
Figura 24 – Imagem dos concretos C2 desenvolvidos com o AMN e com o ARNS. ....	97
Figura 25 – Densidade dos concretos nos estados fresco e endurecido. ....	99
Figura 26 – Índice de vazios, absorção de água e teor de ar dos concretos. ....	100
Figura 27 – Resistência mecânica à compressão dos concretos. ....	103
Figura 28 – Curvas de distribuição do tamanho de partículas do RNS em função da velocidade de rotação (rpm).....	106
Figura 29 – Curvas de distribuição do tamanho de partículas do RNS na velocidade de 300 rpm em função do tempo de cominuição. ....	107

Figura 30 – Curvas de distribuição do tamanho de partículas do RNS na velocidade de 400 rpm em função do tempo de cominuição. ....	108
Figura 31 – Curvas de distribuição do tamanho de partículas dos cimentos utilizados e da PRNS desenvolvida. ....	109
Figura 32 – DRX comparativo do RNS e da PRNS após cominuição. ....	111
Figura 33 – Resistência à compressão das argamassas utilizando a PRNS. ....	112
Figura 34 – Imagens da microscopia da argamassa utilizando a PRNS. ....	113
Figura 35 – Teores de separação magnética a úmido do RNS. ....	114
Figura 36 – Imagem da fração do RNS obtido por separação magnética a úmido. ....	115
Figura 37 – DRX da fração do RNS obtida por separação magnética à úmido. ....	116
Figura 38 – Valorização dos resíduos da tese e desenvolvimento de subprodutos. ....	121
Figura 39 – Valorização dos resíduos da tese como insumos minerais. ....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais óxidos encontrados na nefelina sienito, em porcentagem. ....	37
Tabela 2 – Parâmetros físicos e químicos dos cimentos Portland utilizados. ....	49
Tabela 3 – Dosagem unitária em massa das argamassas desenvolvidas. ....	57
Tabela 4 – Parâmetros de processamento analisados para a cominuição do RNS. .	64
Tabela 5 – Dosagem unitária em massa para estudo da pozolanicidade do RNS. ....	66
Tabela 6 – Classificação ambiental de diferentes resíduos sólidos de mineração. ....	71
Tabela 7 – Caracterização física dos materiais AGN, AMN e ARNS. ....	72
Tabela 8 – FRX dos materiais AMN, AGN, NS e ARNS. ....	76
Tabela 9 – Relações a/c e consistências das argamassas desenvolvidas. ....	86
Tabela 10 – Análises estatísticas dos resultados obtidos para as argamassas. ....	88
Tabela 11 – Parâmetros obtidos para o desenvolvimento das curvas de dosagem. .	95
Tabela 12 – Dosagem unitária em massa dos concretos estudados. ....	96
Tabela 13 – R <sup>2</sup> das propriedades dos concretos em função do teor de ARNS. ....	99
Tabela 14 – Comparações percentuais entre os índices de vazios dos concretos. .	101
Tabela 15 – Valores de tamanho de partículas do RNS em função da velocidade de rotação (rpm) com tempo fixo de 10 min. ....	106
Tabela 16 – Valores de tamanho de partículas do RNS para as velocidades de 300 rpm e 400 rpm em função do tempo de cominuição. ....	108

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resíduos de mineração utilizados em matrizes cimentícias. ....	32
Quadro 2 – Principais minerais encontrados na nefelina sienito. ....	36
Quadro 3 – Estratégias para obter avanços para o modelo da economia circular. ...	45
Quadro 4 – Ações relatadas por empresas para o avanço da economia circular. ....	47
Quadro 5 – Análises e procedimentos adotados para as atividades experimentais.	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AGN – Agregado Graúdo Natural

AMN – Agregado Miúdo Natural

ANM – Agência Nacional de Mineração

ANOVA – Análise de Variância

ARNS – Agregado do Resíduo da Nefelina Sienito

BE – Bélgica

BR – Brasil

C<sub>2</sub>S – Silicato dicálcico ou belita

C<sub>3</sub>A – Aluminato tricálcico

C<sub>3</sub>S – Silicato tricálcico ou alita

C<sub>4</sub>AF – Ferro aluminato tetracálcico

CA – Canadá

Ca/Si – Cálcio/Sílica

CH – Hidróxido de Cálcio ou Portlandita

CP II-F – Cimento Portland composto com material carbonático

CP III – Cimento Portland de alto forno

CP IV – Cimento Portland pozolânico

CP V-ARI-RS – Cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos

CPQvA – Classificação, Potencialidade, Quantidade, viabilidade, Aplicabilidade

C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado

DMC – Dimensão Máxima Característica

DRX – Difração de Raios X

EPA – *Environmental Protection Agency*

FRX – Fluorescência de Raios X

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

IMA – Instituto do Meio Ambiente

IN – Índia

IPT/EPUSP – Instituto de Pesquisas Tecnológicas/Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

JCPDS – *Joint Committee on Power Diffraction Standards*

MCS – Materiais Cimentícios Suplementares  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura  
MME – Ministério de Minas e Energia  
NBR – Norma Brasileira  
NO – Noruega  
NS – Nefelina Sienito  
ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável  
PRNS – Pozolana do Resíduo da Nefelina Sienito  
RAS – Reações Agregado Sílica  
RNS – Resíduo da Nefelina Sienito  
RU – Rússia  
SE – Suécia  
SGB – Serviço Geológico do Brasil  
SINIR – Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos sólidos  
SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento  
TR – Turquia  
ZTI – Zona de Transição Interfacial

## LISTA DE SÍMBOLOS

% – porcentagem  
± – mais ou menos  
≥ – maior ou igual que  
cm – centímetro  
g – grama  
g/cm<sup>3</sup> – grama por centímetro cúbico  
GJ/t – gigajoules por tonelada  
h – hora  
Hz – hertz  
kg – quilograma  
kg/m<sup>3</sup> – quilograma por metro cúbico  
kN – quilonewton  
L – litro  
min – minuto  
mL – mililitro  
mm – milímetro  
MPa/s – megapascal por segundo  
N/s – Newton por segundo  
°C – grau Celsius  
°C/min – grau Celsius por minuto  
°C/s – grau Celsius por segundo  
pH – potencial hidrogeniônico  
s – segundo  
μm – micrometro

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	19
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	<b>Objetivo geral</b>	<b>21</b>
1.2.2	<b>Objetivos específicos</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>22</b>
2.1	MATRIZES CIMENTÍCIAS	22
2.1.1	<b>Composição e características das matrizes cimentícias</b>	<b>22</b>
2.1.2	<b>Materiais cimentícios suplementares</b>	<b>25</b>
2.1.3	<b>Influência dos agregados em matrizes cimentícias</b>	<b>28</b>
2.1.4	<b>Resíduos de mineração em matrizes cimentícias</b>	<b>31</b>
2.2	NEFELINA SIENITO	35
2.2.1	<b>Características e composições</b>	<b>35</b>
2.2.2	<b>Principais mercados consumidores</b>	<b>37</b>
2.2.3	<b>Processo de beneficiamento da rocha</b>	<b>39</b>
2.3	ECONOMIA CIRCULAR E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS	43
<b>3</b>	<b>MATERIAIS</b>	<b>48</b>
3.1	AGREGADOS	48
3.2	LIGANTES	49
3.3	ADITIVOS PLASTIFICANTES	49
<b>4</b>	<b>MÉTODOS</b>	<b>50</b>
4.1	CLASSIFICAÇÃO (C)	52
4.2	POTENCIALIDADE (P)	52
4.2.1	<b>Análise física</b>	<b>52</b>
4.2.2	<b>Análise química e mineralógica</b>	<b>54</b>
4.2.3	<b>Análise morfológica</b>	<b>54</b>
4.2.4	<b>Análise de durabilidade</b>	<b>54</b>
4.3	QUANTIDADE E VIABILIDADE (QV)	56
4.4	APLICABILIDADE (A)	56
4.4.1	<b>Análise do RNS como agregado miúdo em argamassas</b>	<b>56</b>
4.4.2	<b>Análise do RNS como agregado miúdo em concretos</b>	<b>59</b>
4.4.3	<b>Análise do RNS como material cimentício suplementar</b>	<b>64</b>

<b>4.4.4</b>	<b>Análise da segregação da fração ferrosa do RNS</b>	<b>67</b>
<b>4.4.5</b>	<b>Análise da segregação da fração potássica do RNS</b>	<b>67</b>
<b>4.5</b>	<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS</b>	<b>68</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>69</b>
<b>5.1</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO (C)</b>	<b>69</b>
<b>5.2</b>	<b>POTENCIALIDADES (P)</b>	<b>72</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Análise física</b>	<b>72</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Análise química e mineralógica</b>	<b>76</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Análise morfológica</b>	<b>78</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Análise de durabilidade</b>	<b>79</b>
<b>5.3</b>	<b>QUANTIDADE E VIABILIDADE (QV)</b>	<b>83</b>
<b>5.4</b>	<b>APLICABILIDADE (A)</b>	<b>86</b>
<b>5.4.1</b>	<b>Análise do RNS como agregado miúdo em argamassas</b>	<b>86</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Análise do RNS como agregado miúdo em concretos</b>	<b>94</b>
<b>5.4.3</b>	<b>Análise do RNS como material cimentício suplementar</b>	<b>105</b>
<b>5.4.4</b>	<b>Análise da segregação da fração ferrosa do RNS</b>	<b>114</b>
<b>5.4.5</b>	<b>Análise da segregação da fração potássica do RNS</b>	<b>117</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>119</b>
<b>6.1</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>119</b>
<b>6.2</b>	<b>SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS</b>	<b>120</b>
<b>6.3</b>	<b>VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA TESE</b>	<b>121</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>123</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O setor da mineração é responsável pelo fornecimento de recursos minerais para diversos setores, por meio de técnicas de extração e beneficiamento, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento nacional e para a geração de riquezas. Em 2021, o setor de mineração brasileiro terminou com um saldo comercial de aproximadamente 49 bilhões de dólares (IBRAM, 2021a).

No entanto, este mesmo setor também é responsável por elevados impactos ambientais, como o grande consumo de água e energia, alteração e destruição da fauna e flora, poluições (ar, água e solo), geração e descarte de resíduos e rejeitos e pela ocorrência de desastres de grandes proporções, como a ruptura de barragens (DUARTE *et al.*, 2021; VILAÇA *et al.*, 2022; WORLANYO; JIANGFENG, 2021).

Sabe-se que a extração de recursos naturais provoca severos impactos ambientais, mas além das implicações ecológicas e ambientais, a estratégia de uma economia linear não é sustentável e expõe empresas e consumidores a uma elevação dos preços, devido à escassez local e consequente interrupção do fornecimento de insumos. Grandes centros urbanos são os primeiros locais a serem afetados, necessitando de soluções alternativas às matérias-primas naturais.

Além disso, diversos setores industriais são responsáveis pelo consumo elevado de recursos naturais não renováveis, impactando diretamente no aumento da demanda, na redução das reservas e na elevação dos custos destes insumos. Em razão do exposto, torna-se fundamental que esses setores busquem uma maior racionalização e economia, bem como uma produção sustentável a partir do uso de materiais que causem menores impactos ambientais. Como fonte para os recursos necessários, os resíduos sólidos industriais, como os resíduos de mineração, podem ser desenvolvidos para viabilizar a sua utilização.

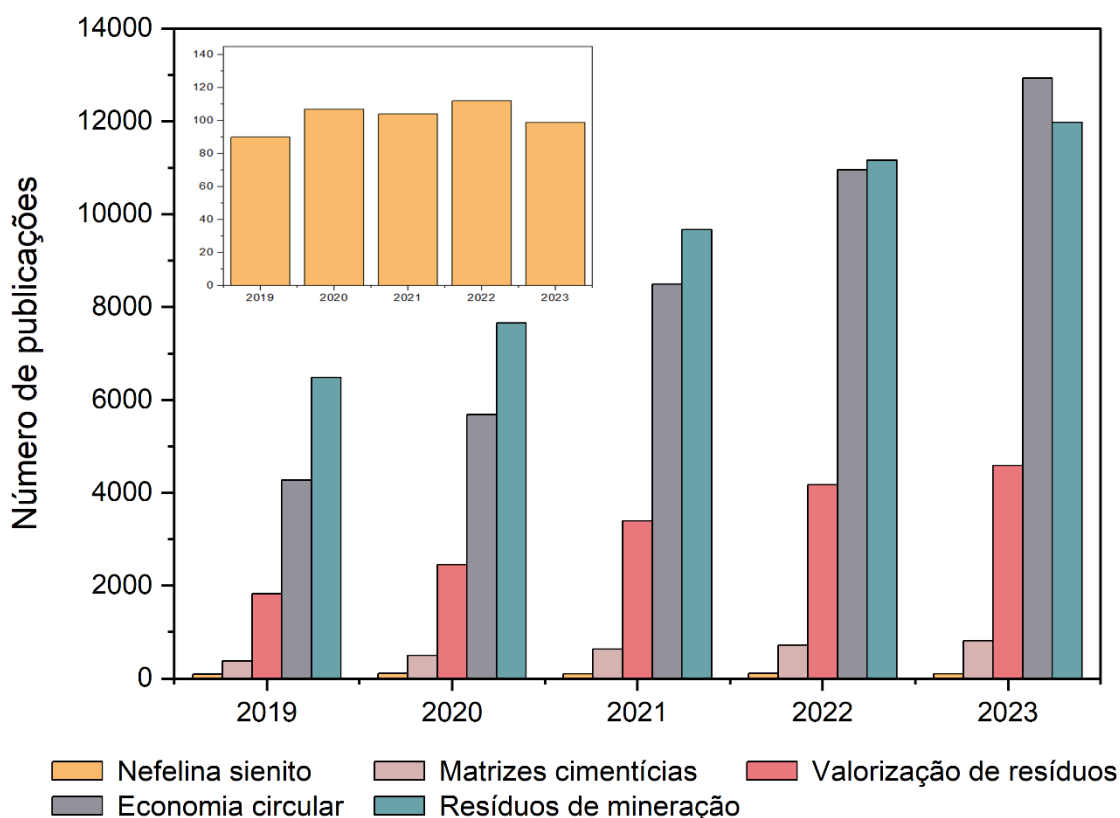
Lottermoser (2011) enxerga os resíduos de mineração como fonte de componentes que podem ser utilizados diretamente ou convertidos, por meio de um fluxo adequado, em um novo produto ainda mais valioso e, para Matinde, Simate e Ndlovu (2018), os diferentes resíduos industriais podem ser considerados, de fato, como fontes secundárias de minerais e metais valiosos.

Observa-se também, que o setor da mineração deve estar integrado com outros setores, como o da construção civil, metalúrgico, ceramista e até mesmo o agrícola, de modo a formar uma simbiose industrial e favorecer o modelo de economia circular,

promovendo, assim, processos com menores desperdícios, reciclagem e reutilização de resíduos (EPA, 2015; FALAGÁN; GRAIL; JOHNSON, 2017). No processo de reciclagem, a busca por novos mercados e aplicações para os resíduos, em outros setores da economia, tem sido a solução mais indicada, facilitando a sua reinserção no ciclo e na economia (EPA, 2015).

De forma a avaliar o número de estudos científicos publicados nos últimos 5 anos (entre 2019 e 2023) associados com as palavras chave desta tese, realizou-se uma busca nos dados da plataforma *Science Direct*. Os termos utilizados, de maneira isolada, foram *nepheline syenite*, *mining wastes*, *cementitious matrices*, *waste valorization* e *circular economy*, e os resultados são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Publicações relacionadas com o tema da tese nos últimos 5 anos.



Fonte: Autor (2024).

Verifica-se que a quantidade de publicações relacionadas à nefelina sienito, em destaque na Figura 1, foram muito similares nos últimos 5 anos, com uma média anual de, aproximadamente, 100 publicações. Este resultado demonstra que esta rocha, seus minerais e suas frações residuais ainda são pouco explorados e valorizados, deixando uma lacuna científica a ser investigada.

Os outros quatro termos analisados apresentam um número crescente de publicações, sendo o mais baixo deles o termo matrizes cimentícias (com 3.041 publicações nos últimos 5 anos). Isso ocorre pois trata-se de um termo mais abrangente, que inclui pesquisas relacionadas a argamassas, concretos, cimentos e materiais cimentícios suplementares, aditivos e adições, sendo menor a quantidade de estudos publicados que abordam dois ou mais destes materiais.

Já os termos valorização de resíduos (16.430 publicações), economia circular (42.343 publicações) e resíduos de mineração (46.950 publicações) refletem a grande preocupação nos tempos atuais, para a busca de melhores práticas para a gestão dos recursos naturais e impactos ambientais relacionados à extração, transformação, uso e descartes dos insumos e produtos.

Diante deste cenário, o resíduo do beneficiamento da nefelina sienito pode ser uma alternativa viável e uma oportunidade para diferentes setores, como os de mineração, construção civil e agricultura, favorecendo uma simbiose industrial, reduzindo impactos ambientais e promovendo a valorização do resíduo da nefelina sienito como estratégia para o avanço na economia circular.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Existe uma estimativa global que, anualmente, são gerados mais de 100 bilhões de toneladas de resíduos provenientes de atividades de mineração (TAYEBI-KHORAMI *et al.*, 2019) e, segundo Kinnunen *et al.* (2018), estes representam um dos maiores fluxos de resíduos do mundo. De acordo com Sedira e Castro-Gomes (2020), os resíduos de mineração representam 55% dos resíduos sólidos industriais na Europa.

Os volumes dos resíduos de mineração, gerados durante os processos extrativistas, dependem de características da rocha, como o grau de intemperismo, o tipo de mineral, suas concentrações e do processo de beneficiamento empregado. A quantidade de resíduos gerados costuma ficar entre 20 a 30% da rocha bruta, mas para algumas rochas, como as ornamentais ou sedimentares, os resíduos podem exceder 90% do material explorado (CAPASSO *et al.*, 2019; FRANCKLIN; RIBEIRO; CORRÊA, 2021; VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).

No Brasil, o índice de recuperação de resíduos sólidos em 2019 foi de apenas 1,67%, considerando como aplicações a reutilização, a reciclagem e a recuperação

energética (SINIR, 2019). Infelizmente, a principal destinação dos resíduos sólidos ainda tem sido aterros sanitários, acumulados em grandes depósitos com riscos potenciais de poluições ambientais.

Esses números alertam para a necessidade do desenvolvimento de ações sustentáveis, com a redução na geração dos resíduos e a busca contínua por seu aproveitamento. De acordo com Capasso *et al.* (2019), um dos setores mais promissores para o aproveitamento de resíduos de mineração é o da construção civil, podendo ter usos diversos como o enchimento de aterros, construção de barragens, estradas, pavimentações e fundações ou como insumos para argamassas, concretos e, também, para a produção de cimentos ou materiais cimentícios suplementares. A utilização de resíduos sólidos e a sua valorização como novos materiais na construção civil, torna-se uma grande oportunidade para o setor, podendo reduzir deslocamentos e promover sustentabilidade aos setores envolvidos (OLIVEIRA, 2017).

No entanto, a aplicação em outros setores industriais também é possível. Com isso, o uso de resíduos sólidos industriais, além das vantagens técnicas e sustentáveis pode, também, proporcionar diminuição energética da exploração, redução de transportes e custos de manutenção dos resíduos, tornando-se uma oportunidade, inclusive, econômica para as empresas.

Segundo a ANM (2019), no ano de 2018 foi estimada uma reserva mineral da rocha nefelina sienito, em Santa Catarina, de aproximadamente 523 milhões de toneladas, com um aumento na produção de 9% em relação ao ano anterior. Cerca de um quarto da rocha nefelina sienito, tem sido descartada em pilhas de rejeitos pelas mineradoras, o que resultaria, até o fim das operações extrativistas, em mais de 130 milhões de toneladas de resíduos sólidos, somente no estado de Santa Catarina (ANM, 2019; VOLKMANN, 2004).

No Brasil, há ainda outros depósitos da nefelina sienito localizados nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais e Bahia, o que eleva os impactos ambientais associados à sua extração e beneficiamento. A nível mundial, as maiores reservas estão localizadas na Rússia, Canadá e Noruega (MCLEMORE, 2009).

Há vários estudos que investigaram rotas de beneficiamento da nefelina sienito, em substituição ao feldspato, para uso nas indústrias ceramistas e vidreiras (BURAT; CANGAL; ONAL, 2006; CRUZ *et al.*, 2018; GUILLET, 1994; MCLEMORE, 2009; VOLKMANN, 2004), mas os estudos que abordam possibilidades para o uso dos

resíduos sólidos da nefelina sienito ainda são escassos, deixando uma lacuna científica a ser investigada.

Desta forma, este estudo investigou o resíduo sólido do processo de beneficiamento da nefelina sienito, buscando promover a sua valorização como insumo mineral para a construção civil, em especial para o desenvolvimento de argamassas e concretos, como também para outros setores industriais, como o agrícola, contribuindo para a formação de uma simbiose industrial e avanço da circularidade na economia.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Contribuir para a circularidade de fluxo de minerais na economia, usando como estratégia a valorização do resíduo do beneficiamento da nefelina sienito, como insumo mineral para a construção civil e agricultura.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar parâmetros físico-químicos do resíduo da nefelina sienito e sua potencialidade para atuação na construção civil como agregado miúdo em matrizes cimentícias;
- b) Avaliar o processamento para ativação mecânico-química, a partir da moagem de alta energia do resíduo da nefelina sienito, e desenvolver material cimentício suplementar investigando sua utilização em substituição ao cimento;
- c) Analisar as argamassas e concretos desenvolvidos, a partir de propriedades nos estados fresco e endurecido, para a observação do desempenho dos diferentes sistemas cimentícios;
- d) Avaliar possíveis características potencias a partir de rotas de segregação para a fração ferrosa e potássica presente no resíduo da nefelina sienito.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MATRIZES CIMENTÍCIAS

#### 2.1.1 Composição e características das matrizes cimentícias

As matrizes cimentícias são compostas, basicamente, por ligantes, como o cimento Portland e a cal hidratada, por agregados, grãos e miúdos, água e podem conter adições minerais e aditivos químicos. Alguns exemplos, utilizados na construção civil, são as argamassas e concretos, de cimentos Portland ou cimentos álcali-ativados (geopolímeros). Este estudo se concentra nas argamassas e concretos de cimento Portland para uso na construção civil.

O cimento Portland pode ser definido como um aglomerante hidráulico, resultante da mistura e homogeneização de matérias-primas, calcário e argilas, podendo haver materiais corretivos. Esses insumos são posteriormente calcinados em um forno, em temperaturas de até 1450 °C, formando nódulos granulares conhecidos como clínquer, que devem ser finamente moídos juntamente com uma pequena quantidade de gesso (até 5%). As matérias-primas fornecem quatro elementos essenciais, sendo eles, em teores aproximados, o óxido de cálcio (64%), a sílica (21%), a alumina (6%) e o óxido de ferro (3%), que se combinam para formar os silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. Os silicatos de cálcio, alita ( $C_3S$ ) e belita ( $C_2S$ ), em contato com água se hidratam para formar o hidróxido de cálcio (CH) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsáveis pela resistência mecânica. Já os aluminatos, tricálcio ( $C_3A$ ) e tetracálcio ( $C_4AF$ ), influenciam o início e fim de pega. Os cimentos comerciais podem ter o clínquer parcialmente substituído por escória de alto forno, pozolana ou fíler. Os diferentes tipos de cimento Portland são amplamente utilizados em argamassas e concretos pelo mundo todo, nas mais diversas obras de engenharia (BAUER, 2019; ISAIA, 2017; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A cal é um ligante aéreo simples, obtido do processo de calcinação do carbonato de cálcio, proveniente de rochas calcárias, em temperaturas de aproximadamente 900 °C, para produção do óxido de cálcio. Como a composição química influencia o desempenho da cal, opta-se pela calcita em relação a dolomita (que apresenta impurezas como o óxido de magnésio). O óxido de cálcio obtido da calcinação, é conhecido como cal virgem ou simplesmente cal, e deve passar por um

processo de hidratação para produzir a cal hidratada, ou hidróxido de cálcio, sendo está a forma mais utilizada pela construção civil. Sua principal aplicação é para argamassas de assentamento e revestimento, reagindo, após aplicação, de forma lenta, devido à difusão do CO<sub>2</sub> do ambiente pela espessura da camada de argamassa, para se recarbonatar em carbonato de cálcio. Sua resistência é bem inferior ao cimento Portland, mas são muito utilizadas pois conferem às argamassas propriedades, no estado fresco, como maior plasticidade e retenção de água e no estado endurecido, menor retração, menor módulo de elasticidade e maior porosidade, aumentando a capacidade de absorver deformações sem se romperem (BAUER, 2019; CINCOTTO *et al.*, 2017; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A NBR 7211 (ABNT, 2022) define os agregados como materiais granulares, que não possuem forma ou volumes definidos, mas têm dimensões e propriedades adequadas para obras de engenharia e para a produção de argamassas e concretos. Desta forma, diferentes resíduos sólidos podem ser classificados como agregados para uso na construção civil, desde que confirmada a sua viabilidade técnica.

Os agregados são utilizados em grandes proporções nas matrizes cimentícias, de 70 a 80% do volume, contribuindo para a estabilidade e redução das variações volumétricas, aumento da resistência mecânica, durabilidade e desempenho estrutural e, também, para a redução do custo de produção, entretanto afetam a fluência dos compósitos (BAUER, 2019; FARIAS; PALMEIRA; BEJA, 2017).

As argamassas podem ser definidas como materiais obtidos pela mistura homogênea de um ou mais ligantes, hidráulicos ou aéreos, com agregados miúdos e água, podendo conter aditivos ou adições minerais. São amplamente utilizadas no setor da construção civil para elevação de alvenarias, assentamento de peças cerâmicas, regularização de superfícies e como revestimentos, podendo ser classificadas de diferentes maneiras como natureza, tipo e número de aglomerantes, função que desempenha, forma de preparo, local de aplicação, acabamento e propriedades especiais. Uma das classificações mais utilizadas pela construção civil é relativa à função que desempenha, sendo denominadas como argamassas de assentamento e de revestimento (BAUER, 2019; CARASEK, 2017; RECENA, 2012).

As argamassas de assentamento são cruciais para o bom desempenho de uma parede de alvenaria, pois apresentam a função de unir as unidades, blocos cerâmicos ou de concreto, construindo um elemento com estrutura monolítica e, além disso, promovem uma melhor acomodação do sistema, distribuindo uniformemente as

cargas atuantes, absorvendo deformações naturais e evitando trincas. Já as argamassas de revestimento, desempenham a função de revestir paredes e tetos, dando estanqueidade, durabilidade, contribuindo para o isolamento térmico e acústico, fornecendo maior conforto aos usuários (CARASEK, 2017; RECENA, 2012).

Para isso, as argamassas devem proporcionar propriedades adequadas no estado fresco em relação à trabalhabilidade, consistência, plasticidade, adesão, retenção de água, densidade de massa e produtividade. Já no estado endurecido em relação à aderência, retração, permeabilidade, absorção de água por capilaridade, módulo de elasticidade, resistência à compressão e tração na flexão (CARASEK, 2017; CINCOTTO *et al.*, 2017; RECENA, 2012; SABATINNI, 1986).

O concreto é um material compósito obtido pela mistura de vários materiais, sendo ao menos um ligante, principalmente o cimento, podendo conter materiais cimentícios suplementares. Esses ligantes são hidráulicos e, juntamente com a água, promovem a aglutinação de partículas ou fragmentos de rochas (agregados miúdos e graúdos) onde, frequentemente, também estão presentes em menores quantidades, aditivos químicos e adições minerais. Como resultado das reações de hidratação entre os materiais, forma-se um produto durável, resistente, com grande variedade de formas e tamanhos, custos acessíveis, atendendo às diversas solicitações para uso em obras de engenharia (BAUER, 2019; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os concretos podem ser classificados em relação à densidade (leves, normais, pesados), resistência à compressão (baixa, moderada, alta, ultra alta), elementos constituintes (graute, ciclópico, armado, reforçado), fluidez (seco, fluido), aspecto (coesivo, segregado), textura (liso, rugoso), aplicações (projetado, auto adensável, submerso, protendido) e especiais (BAUER, 2019; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Dentre as principais propriedades que os concretos devem possuir destacam-se, no estado fresco, a fluidez (medida pelo abatimento do tronco cone) e coesão (de forma a evitar segregação e exsudação) e, no estado endurecido, a resistência mecânica à compressão, porosidade, módulo de elasticidade, tenacidade e durabilidade (HELENE; ANDRADE, 2017; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Como forma de minimizar os impactos ocasionados pela construção civil, pela alta demanda de recursos minerais naturais e energéticos, associados ao elevado consumo de agregados e insumos para a produção do cimento Portland, os resíduos sólidos industriais tem sido uma alternativa, usados como materiais cimentícios suplementares ou agregados, para o desenvolvimento de matrizes cimentícias.

### 2.1.2 Materiais cimentícios suplementares

O termo materiais cimentícios suplementares (MCS) tem sido utilizado para descrever materiais alternativos, compostos de partículas finas e substâncias siliciosas ou aluminosiliciosas, solúveis, que tem potencialidade para serem usados em substituição ao cimento Portland e possuem características semelhantes ou podem suplementar as propriedades de matrizes cimentícias (JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019; PANESAR; ZHANG, 2020; PARIS *et al.*, 2016).

Os MCS podem ser divididos em autocimentantes e pozolânicos. Os autocimentantes, como a escória granulada de alto forno moída, demonstram propriedades hidráulicas, similares às que ocorrem no cimento Portland, reagindo quando em contato com a água para formar produtos com propriedades cimentícias, como o hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado. Já as pozolanas são materiais que não possuem propriedades cimentícias quando em contato com água, mas que ocorrem quando o hidróxido de cálcio está presente (PARIS *et al.*, 2016).

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), os materiais pozolânicos são definidos como materiais siliciosos e aluminosos, que possuem baixo valor cimentício quando sozinhos, mas que, após serem finamente moídos e na presença de água e de hidróxido de cálcio, são capazes de reagir quimicamente, em temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentícias, como os C-S-H.

No entanto, quando as pozolanas são utilizadas, a formação do C-S-H resultante das reações com hidróxido de cálcio, C-S-H secundário, são diferentes do C-S-H produzido pelo cimento Portland, C-S-H primário. Isso ocorre devido à diferença de disponibilidade de cálcio/sílica (Ca/Si). Assim, a relação Ca/Si do C-S-H secundário é menor, variando de 0,6 a 1,4, enquanto essa relação é de 1,2 a 2,3 para o C-S-H primário. Essa menor relação de Ca/Si deixa o C-S-H secundário propenso para a absorção de cátions provenientes de álcalis (LU *et al.*, 2017).

Alguns dos principais materiais cimentícios suplementares são provenientes do aproveitamento de resíduos sólidos, como as cinzas volantes do carvão mineral (termoelétricas), a escória granulada de alto forno (produção do ferro gusa), a sílica ativa ou microsílica (produção de ferro silício) e o metacaulim (produção de papel). No entanto, outros materiais também podem ser utilizados como alternativas, sendo eles: o vidro moído, o lodo de esgoto e diferentes cinzas volantes (casca de arroz, bagaço de cana de açúcar, combustão de biomassa, combustão do óleo de palma, madeira,

bambu, casca de ostras), entre outras (JIANG *et al.*, 2019; JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019; PANESAR; ZHANG, 2020; PARIS *et al.*, 2016).

Alguns dos benefícios que o uso dos MCS podem proporcionar às matrizes cimentícias são o aumento da resistência mecânica a longo prazo, menor permeabilidade, maior resistência a íons deletérios como cloretos e sulfatos, maior resistência à corrosão, mitigação de reações álcali-sílica e da formação de etringita tardia, maior durabilidade, redução do calor de hidratação, maior resistência ao congelamento/descongelamento; podem melhorar o empacotamento da partículas, refinar os poros, além de vantagens ambientais como a redução do consumo de energia e da emissão de gases nocivos ao meio ambiente (JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019; PANESAR; ZHANG, 2020; PARIS *et al.*, 2016; ZHANG; LING, 2020).

É desejável que os MCS, além de finos, apresentem estrutura química amorfa ao invés da cristalina, tornando-os mais pozolânicos, pois o material no estado amorfo apresenta solubilidade muito maior (JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019; ZHANG; LING, 2020). No entanto, alguns materiais necessitam de mecanismos para se alcançar uma ativação adequada, especialmente quando a estrutura do material é cristalina e com relativa estabilidade. Estes mecanismos incluem a ativação térmica, mecânica e de micro-ondas ou a associação destas técnicas (ZHANG; LING, 2020).

Um dos métodos de ativação mais promissores é a ativação térmica, capaz de desestabilizar a estrutura cristalina de um material, promover a desidroxilação, aumentar o amorfismo e, conseqüentemente, a sua reatividade, quando exposto a temperaturas elevadas. Entretanto, a temperatura ideal de cada material, potencialmente pozolânico, deve ser investigada, pois quando o material é exposto a temperaturas acima da faixa ideal, pode ocorrer a recristalização de fases (CAO *et al.*, 2016; VEGAS *et al.*, 2015; RODRÍGUEZ; FRÍAS; TOBÓN, 2021; WU *et al.*, 2021).

A ativação mecânica é outra forma que tem sido bastante explorada como alternativa para aumentar a pozolanicidade dos materiais. Este processo promove uma mudança físico-química por meio de processos de cominuição que, além de reduzir o tamanho das partículas, também desencadeia transformações na microestrutura cristalina, produzindo defeitos e distorções na rede, tornando-o metaestável e mais reativo (MUCSI *et al.*, 2021; ZHANG; LING, 2020).

De acordo com Mirzahosseini e Riding (2015), a redução do tamanho de partícula pode aumentar consideravelmente a reatividade, obtendo maior índice de atividade e consumo de portlandita entre 0 e 25  $\mu\text{m}$ , médio índice entre 25 e 38  $\mu\text{m}$  e

baixo índice entre 63 e 75  $\mu\text{m}$ . Mesmo materiais siliciosos, como o quartzo, que são considerados sem reatividade de hidratação, podem alcançar considerável reatividade quando ultrafinos (menores que 5  $\mu\text{m}$ ), resultado do grande aumento da área de superfície (MITROVIC; ZDUJIC, 2014). No entanto, o excesso de moagem também pode resultar em efeito adverso, reduzindo parcialmente a reatividade devido ao efeito de aglomeração das partículas (GUO *et al.*, 2016; MUCSI *et al.*, 2021).

A ativação por micro-ondas está relacionada ao efeito do aquecimento pela radiação, com finalidade semelhante à ativação térmica, transformando a estrutura química cristalina do material. Como vantagem, esta técnica permite o aquecimento uniforme, por todo o volume do material e com tempos relativamente pequenos, pois consegue depositar a energia no interior da partícula, aumentando a eficiência de aquecimento (AO *et al.*, 2018; CONG *et al.*, 2020; MOTASEMI; AFZAL, 2013).

Para a escolha de qualquer uma das técnicas a ser adotada, recomenda-se um estudo da eficiência para ativação da reatividade e aumento da pozolanicidade, necessários para cada material, como forma de otimizar o processo e evitar desperdícios energéticos, minimizando os impactos ambientais associados às técnicas. Vale ressaltar que as técnicas apresentadas mesmo que consumam recursos enérgicos consideráveis, ainda são bem inferiores aos necessários para a produção do clínquer (3,5 GJ/t), como a argila calcinada para a produção do metacaulim (0,35 GJ/t) ou mesmo os resíduos sólidos, onde a energia está associada ao produto e não ao resíduo (JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019).

Outro material, que pode ainda substituir parcialmente o cimento Portland, é a rocha calcária finamente moída, conhecida como fíler calcário, contendo elevados teores de carbonato de cálcio. No entanto, não apresenta propriedades cimentícias ou pozolânicas como os materiais cimentícios suplementares e, por isso, existem limitações para os teores de substituição, geralmente, menores que 20%, sendo classificados como adições minerais para as matrizes cimentícias. Contudo, são capazes de contribuir com efeitos físicos e químicos, modificando a distribuição das partículas e tamanho dos poros, diminuindo a porosidade total, aumentando a densidade de empacotamento, agindo como pontos de nucleação heterogênea e reduzindo a hidratação do aluminato tricálcio (HAWKINS; TENNIS; DETWILER, 2005; PANESAR; ZHANG, 2020).

### 2.1.3 Influência dos agregados em matrizes cimentícias

Os agregados podem ter origem em rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares, com predominância de diferentes minerais. No entanto, em relação à composição química e mineralógica, é desejável que sejam siliciosas, com partículas inócuas e inertes, de modo a não reduzirem a durabilidade das matrizes produzidas (NEVILLE, 2016; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os agregados podem ser classificados, em relação à sua forma, em arredondados, cúbicos, irregulares, lamelares, angulosos e alongados. Já em relação à textura, podem possuir uma textura superficial do tipo vítrea, lisa, granular, áspera, cristalina ou alveolar (NEVILLE, 2016).

O formato arredondado ou cúbico para os agregados, em relação a outros formatos, como os lamelares ou alongados, pode otimizar a estrutura de empacotamento do sistema, apresentando maior contato da pasta em torno das partículas, resultando em um melhor intertravamento entre matriz e agregado (KUSUMAWARDANI; WONG, 2020). Além disso, agregados planos e alongados são mais propícios a formarem regiões com acúmulo de água, devido ao efeito de exsudação, resultando em uma zona de transição interfacial (ZTI) mais fraca, reduzindo o desempenho do material (KASU *et al.*, 2019).

Em relação à distribuição granulométrica dos agregados miúdos, as areias classificadas como médias (módulo de finura entre 1,8 e 2,8), com distribuição contínua e grãos arredondados, produzem melhores resultados (SABATINNI, 1986). Grãos angulosos e lamelares, bem como textura áspera, dificultam a trabalhabilidade e demandam maior consumo de pasta. Já as distribuições granulométricas quando uniformes ou descontínuas, diminuem o empacotamento e aumentam a porosidade do sistema (FARIAS; PALMEIRA; BEJA, 2017; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A quantidade de agregados miúdos utilizados na matriz cimentícia, bem como suas propriedades (especialmente o tamanho, forma, textura e porosidade), possuem uma forte influência na demanda de água e trabalhabilidade das argamassas, afetando a sua reologia. Maiores quantidades de partículas finas, presentes principalmente em agregados triturados e não lavados, aumentam a área da superfície, demandando maior quantidade de água para molhar as partículas. Partículas porosas absorvem parte da água necessária para manter a fluidez do sistema. A forma e a textura das partículas contribuem para a mobilidade do sistema

cimentício, e quando as partículas não são arredondadas ocasionam uma maior quantidade de pasta para manutenção da fluidez. Assim, os agregados miúdos podem aumentar a tensão de escoamento das argamassas, contribuindo para o aumento da viscosidade plástica e do atrito entre partículas (HAACH; VASCONCELOS; LOURENÇO, 2011; NEVILLE, 2016; WESTERHOLM *et al.*, 2008).

Em relação à influência dos agregados miúdos nas propriedades das argamassas, no estado endurecido, a classificação granulométrica apresenta baixa interferência, de forma direta na resistência à compressão, mas contribuem para modificar a porosidade e empacotamento do sistema. No entanto, influenciam fortemente as deformações, módulo de elasticidade e rigidez, onde areias mais grossas conduzem a um comportamento mais deformável e dúctil (HAACH; VASCONCELOS; LOURENÇO, 2011). Agregados com maior módulo de finura, mais grosseiros, e também com texturas mais ásperas, apresentam melhor aderência entre os agregados e a pasta (CARASEK, 1996; NEVILLE, 2016).

O uso de alguns agregados naturais ou materiais alternativos, como os resíduos sólidos, podem favorecer o surgimento de patologias, como as reações álcali-agregados ou também conhecidas como reações álcali-sílica (RAS). Essas reações ocorrem quando o agregado, fonte de sílica, possui estrutura química amorfa metaestável e reativa, onde na presença de álcalis (sódio e potássio) contidos no cimento Portland, produzem na superfície do agregado um gel, que se expande na presença de alta umidade, ocasionando deterioração das matrizes cimentícias (KAWABATA *et al.*, 2019; WEI *et al.*, 2019).

Como forma de prevenir a ocorrência das RAS, recomenda-se o uso de agregados não reativos, quando disponíveis, cimentos com baixos teores de álcalis totais ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) e uso de materiais cimentícios suplementares, como a cinza volante, a escória de alto-forno ou o metacaulim. Os MCS reduzem as RAS pois refinam a microestrutura, reduzindo a porosidade e a permeabilidade, além de consumir o hidróxido de cálcio para formação do C-S-H, que auxilia na redução dos íons alcalinos (MOSER *et al.*, 2010; WEI *et al.*, 2019).

As matrizes cimentícias quando sujeitas a efeitos de secagem, retração autógena ou térmicas, podem desenvolver tensões que, acima da resistência à tração, resultam em trincas e rachaduras. Em geral, as microfissuras ocorrem na superfície dos agregados, devido à retração incompatível entre a pasta de cimento e os agregados, e progridem até trincas e rachaduras, reduzindo a rigidez, resistência e

durabilidade (KANNA; OLSON; JENNINGS, 1998; YURTDAS; BURLION; SKOCZYLAS, 2004). Segundo Idiart *et al.* (2012), a quantidade de trincas na superfície das partículas é maior com o aumento do tamanho do agregado miúdo e da sua fração volumétrica, onde as partículas menores que 1 mm não causam microfissuras detectáveis experimentalmente.

Para os concretos, o agregado miúdo não apresenta efeitos significativos na retração, sendo essa propriedade controlada pelo tipo de agregado graúdo, área da superfície, absorção e porosidade (ZHANG; ZAKARIA; HAMA, 2013).

Uma análise realizada com concretos em situações de temperaturas elevadas (até 300 °C) foi conduzida utilizando dois agregados miúdos, areia fina (menor que 600 µm) e areia grossa (menor que 5 mm). Os resultados demonstraram que a presença de agregados maiores aumentou a permeabilidade dos concretos, devido à formação de fissuras, resultantes da expansão térmica incompatível entre a pasta de cimento e os agregados de 5 mm, ocasionando uma falha da ligação entre o agregado e a matriz cimentícia. Esses efeitos não foram observados utilizando somente a fração fina, menor que 600 µm (LI; TAN; YANG, 2018).

Em relação à resistência à fadiga, observa-se que as trincas se propagam ao longo de um caminho específico e tendem a contornar a superfície dos agregados. Desta forma, o aumento do tamanho do agregado, ou da distribuição granulométrica, aumenta o tempo de propagação da trinca e a energia de fratura em carregamentos estáticos (BEYGI *et al.*, 2014; SIREGAR; RAFIQ; MULHERON, 2017). Para carregamentos dinâmicos, agregados menores apresentaram maior número de ciclos de vida, quase três vezes superior, em relação a agregados maiores, sendo mais expressivos para carregamentos menores, 80% da resistência, e praticamente idênticos em carregamentos maiores, 90% da resistência. Uma possibilidade para o aumento do número de ciclos de vida pode ter sido promovido por uma melhora do empacotamento dos grãos, reduzindo a porosidade e ajudando a retardar a propagação das trincas (KASU *et al.*, 2019).

Assim, os agregados apresentam elevada influência nas propriedades das argamassas e concretos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, devido à sua origem e composição mineralógica, distribuição granulométrica, forma e textura, podendo afetar propriedades como fluidez, porosidade, rigidez, absorção de água, permeabilidade e durabilidade, além das resistências mecânicas.

#### 2.1.4 Resíduos de mineração em matrizes cimentícias

Os resíduos de mineração são resultantes do processo de exploração, desmonte, britagem, tratamentos físicos e químicos em geral, que têm por finalidade modificar a morfologia do maciço extraído para uma forma mais adequada de comercialização ou que concentre os minerais de interesse, retirando os não comerciais e prejudiciais ao produto, gerando grandes quantidades de estéreis, resíduos e rejeitos (AKINYEMI; ALABA; RASHEDI, 2022; RANA *et al.*, 2016).

Assim, os resíduos sólidos industriais, em especial os relativos aos processos de mineração, são conhecidos pelos impactos ambientais que provocam, pelos elevados volumes gerados e também pelos custos relativos com o seu tratamento e disposição. No entanto, estes mesmos resíduos podem ser fonte de minerais essenciais para diversos setores, como o da construção civil e, por isso, são frequentemente estudados em busca de novas estratégias que proporcionem sua valorização e possibilitem sua inserção na economia (LOTTERMOSER, 2011; MATINDE; SIMATE; NDLOVU, 2018; RANA *et al.*, 2016).

Sendo o setor da construção civil um dos maiores demandantes por recursos naturais para as suas diversas atividades, os resíduos sólidos de mineração podem ser, de fato, uma alternativa, fazendo um contraponto entre os volumes gerados pelas mineradoras e os necessários na indústria da construção civil.

Como os resíduos de mineração podem ser gerados em cada operação, desde o desmonte ou escavação até o produto final acabado, eles variam em relação ao tamanho da partícula, desde centímetros até micrometros, como pedregulhos, areias, siltes, argilas, pós, lamas ou lodos, podendo ser inertes ou conter contaminantes, como produtos químicos tóxicos (RANA *et al.*, 2016).

Há várias possibilidades para o uso dos resíduos sólidos oriundos da mineração como insumos para o desenvolvimento de matrizes cimentícias, tais como: agregados (miúdos ou grãos), fíler ou adições minerais, pozolanas ou materiais cimentícios suplementares, ou mesmo como precursores para cimentos álcali-ativados (geopolímeros), usados para o desenvolvimento de argamassas, concretos e elementos pré-moldados (blocos e pavers). O Quadro 1 apresenta alguns resíduos sólidos de mineração utilizados como insumos para matrizes cimentícias.

Quadro 1 – Resíduos de mineração utilizados em matrizes cimentícias.

Autores	Resíduo	Aplicação				
		Agregado	Ligante	Argamassa	Concreto	Geopolímero
Fontes <i>et al.</i> (2016)	Minério de ferro	x	x	x		
Zhao, Fan e Sun (2014)	Minério de ferro	x			x	
Defáveri <i>et al.</i> (2019)	Minério de ferro		x			x
Weishi <i>et al.</i> (2018)	Minério de ferro		x		x	
Vegas <i>et al.</i> (2015)	Carvão mineral		x	x		
Caneda-Martínez <i>et al.</i> (2018)	Carvão mineral		x	x		
Modarres <i>et al.</i> (2018)	Carvão mineral	x	x		x	
Capasso <i>et al.</i> (2019)	Cobre - Zinco	x				x
Sedira e Castro-Gomes (2020)	Tungstênio		x			x
Gonzáles <i>et al.</i> (2020)	Fluorita	x			x	
Longhi <i>et al.</i> (2016)	Caulim		x			x
Kumar, Gupta e Shrivastava (2017)	Arenito	x			x	
Tolstoy <i>et al.</i> (2020)	Arenito	x			x	
Francklin, Ribeiro e Corrêa (2021)	Quartzito	x		x	x	
Siddique e Jang (2020)	Molibdênio		x	x		
Carvalho <i>et al.</i> (2022)	Quartzo	x			x	
Machi <i>et al.</i> (2021)	Fosfato	x			x	

Fonte: Autor (2024).

O uso dos resíduos sólidos de mineração, quando em substituição integral aos agregados naturais, tendem a reduzir as propriedades mecânicas das argamassas e concretos, principalmente a trabalhabilidade das argamassas e a resistência à compressão dos concretos. Porém, em substituições parciais, demonstram comportamento similar aos insumos convencionais. Essa redução nas propriedades está associada ao formato e textura das partículas, distribuições granulométricas, menores densidades, maiores porosidades, presença de impurezas, menor rigidez e dureza dos resíduos utilizados como agregados (CAPASSO *et al.*, 2019; FONTES *et al.*, 2016; KUMAR; GUPTA; SHRIVASTAVA, 2017; ZHAO; FAN; SUN, 2014).

No entanto, quando se é proposto utilizar resíduos sólidos como agregados para matrizes cimentícias, é importante conduzir análises em termos de durabilidade, como ocorrem em métodos acelerados em ambientes agressivos, NaOH ou Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ou de longa duração em ambientes de uso, ao ar (TAFESSE *et al.*, 2020).

Os resíduos de mineração, quando utilizados como agregados, podem desenvolver reações deletérias, devido à variação dimensional das matrizes cimentícias. Um exemplo são as reações álcalis-agregados, que ocorrem quando existe em sua composição elevados teores de sílica amorfa ou deformada e maiores concentrações de álcalis, como sódio e potássio. Os agregados provenientes dos resíduos de mineração também podem favorecer a permeabilidade e a migração de íons deletérios, como os cloretos, ocasionando manifestações patológicas nas matrizes cimentícias (CANEDA-MARTÍNEZ *et al.*, 2018; FRANCKLIN; RIBEIRO; CORRÊA, 2021; RANA *et al.*, 2016).

As orientações e ações estipuladas nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas em 2015, em especial no 12º objetivo, “Consumo e Produção Responsáveis”, favorecem o desenvolvimento da economia circular e tem encorajado o uso de materiais alternativos ao consumo de cimento Portland em todo o mundo, dando lugar à utilização de resíduos sólidos industriais como materiais cimentícios suplementares (ODS, 2020).

No Brasil, por meio da NBR 16697 (ABNT, 2018), os cimentos Portland já tiveram os limites aumentados para os teores de substituição do clínquer por materiais carbonáticos (até 25% no CP II-F), escória de alto forno (até 75% no CP III) e materiais pozolânicos (até 50% no CP IV). De acordo com SNIC (2019), a tendência é que os cimentos utilizem cada vez menos clínquer, passando do valor médio de 65% em 2020 para 59% em 2030, 54% em 2040 e 52% em 2050.

Além das vantagens ambientais que a redução do clínquer promove, inclusive com redução das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente, o uso de resíduos sólidos industriais, como materiais cimentícios suplementares, são capazes de melhorar o desempenho mecânico das matrizes cimentícias. Uma delas é a resistência aos cloretos, pois a adição de materiais pozolânicos modificam a microestrutura das matrizes cimentícias, refinando a rede de poros e, conseqüentemente, a permeabilidade do sistema é reduzida (CANEDA-MARTÍNEZ *et al.*, 2018). Os materiais pozolânicos, contendo aluminatos, podem fixar os íons cloro formando cloroaluminatos e, assim, contribuem substancialmente para a resistência à penetração dos cloretos (PARIS *et al.*, 2016).

Os materiais cimentícios suplementares também são capazes de aumentar a resistência mecânica a longo prazo, devido ao consumo do hidróxido de cálcio para a formação de silicatos de cálcio hidratados, como também reduzir a potencialidade da ocorrência de reações álcalis-agregados e da formação de etringita tardia, aumentar a resistência a ambientes agressivos e a vida útil dos materiais. Em geral, os teores de substituição do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares variam de 0 a 50%, com melhores desempenhos entre 10 e 20%, onde os resultados dependem do tipo e propriedades dos resíduos utilizados, mas também dos cimentos adotados (MEDINA *et al.*, 2017; PARIS *et al.*, 2016; VEGAS *et al.*, 2015).

Como agentes precursores para cimentos álcalis-ativados, ou geopolímeros, resíduos como cinzas volantes e escórias de alto forno têm sido utilizados em substituição a materiais convencionais (metacaulins), como fonte de aluminossilicatos necessários para que as reações químicas ocorram, quando em contato com o elemento ativador, como os hidróxidos de sódio e silicatos de sódio (CRISTELO *et al.*, 2019; LONGHI *et al.*, 2016). No entanto, os resíduos de mineração também apresentaram potencial para a aplicação como base precursora de cimentos álcali-ativados, devido à presença necessária de alumina e minerais de silicato, promovendo resultados similares ao uso do metacaulim (AKINYEMI; ALABA; RASHEDI, 2022; DEFÁVERI *et al.* 2019; LONGHI *et al.*, 2016; SEDIRA; CASTRO-GOMES, 2020).

Desta forma, o uso dos resíduos de mineração, em matrizes cimentícias, deixa evidente as vantagens que podem promover para a sustentabilidade e como estratégia para a economia circular. Dentre elas, destacam-se a redução das áreas destinadas a aterros, a diminuição do esgotamento de agregados naturais e a redução da emissão de carbono e carbono equivalente (KUMAR; GUPTA; SHRIVASTAVA, 2017; SEDIRA; CASTRO-GOMES, 2020; VEGAS *et al.* 2015).

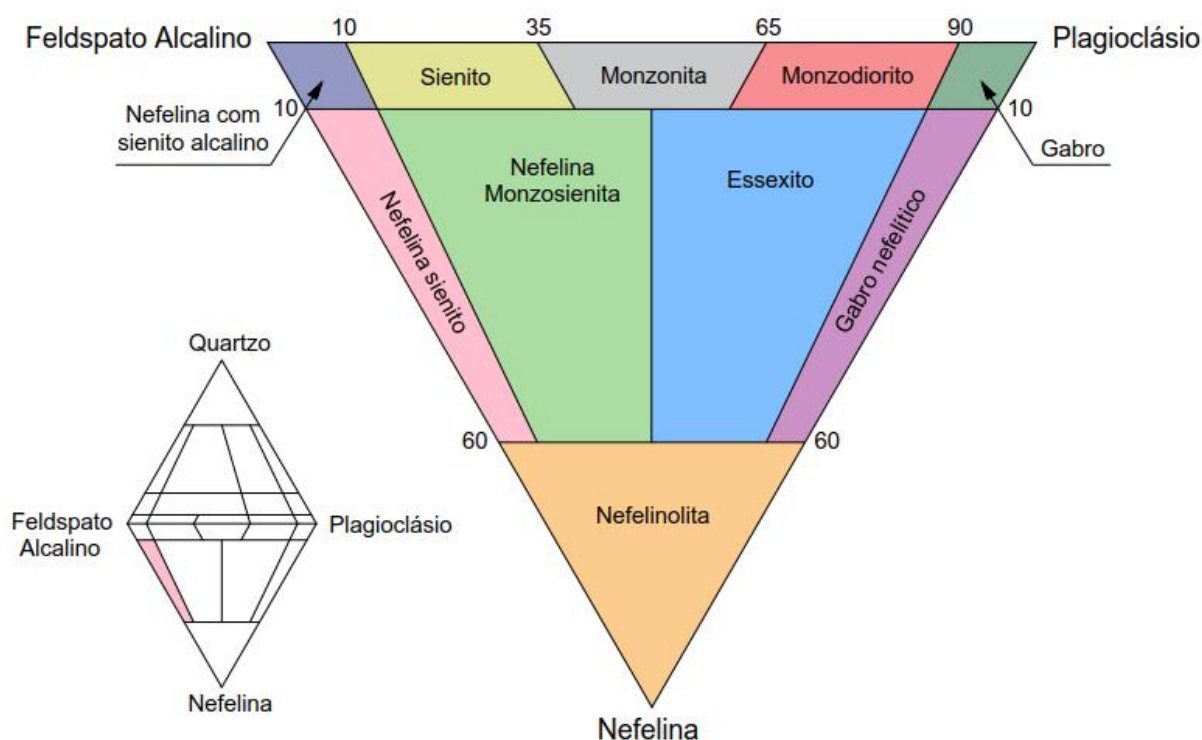
## 2.2 NEFELINA SIENITO

### 2.2.1 Características e composições

A nefelina é um mineral aluminossilicato contendo sódio e potássio, do grupo dos feldspatóides, formada pelo resfriamento do magma quando a sílica está em quantidade insuficiente para formar o feldspato. Os feldspatóides apresentam cerca de 1/3 do conteúdo de sílica dos feldspatos e, por isso, formam soluções ricas em álcalis, principalmente o sódio e potássio (MCLEMORE, 2009; WINTER, 2014).

Já a nefelina sienito é um dos feldspatóides mais comuns, sendo praticamente livre ou isenta de quartzo e com a presença de minerais ferromagnesianos (como piroxênio sódico, anfibólio alcalino e biotita), apresentando uma textura do tipo granítica ou gnáissica (MCLEMORE, 2009; SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2008). A Figura 2 ilustra o diagrama para formação de rochas alcalinas, com área destacada para a nefelina sienito, e também um diagrama secundário identificando a posição da nefelina sienito, em relação ao quartzo, com teor de sílica subsaturada. Este diagrama é similar para os diferentes feldspatóides, podendo a nefelina ser substituída no diagrama por minerais como a leucita, sodalita e cancrinita.

Figura 2 – Diagrama ternário para formação de rochas alcalinas.



Fonte: Adaptado de Winter (2014).

Os feldspatos alcalinos são aluminossilicatos contendo potássio e sódio, tendo como origem rochas ígneas, metamórficas ou mesmo sedimentares. Eles podem ser K-feldspatos (potássicos, como microclina ou ortoclásio) e Na-feldspatos (sódicos, como a albita). Já os feldspatos plagioclásios, ou plagioclásios, são aluminossilicatos que contem sódio e cálcio em sua estrutura (MCLEMORE, 2009; WINTER, 2014).

Os sienitos representam um grupo de rochas ígneas plutônicas, associadas a rochas como gabros, anortositos e granitos, formados como resultado da cristalização fracionada de um magma basáltico ou pela assimilação de rochas ricas em álcalis. Os sienitos possuem em sua composição quase que exclusivamente feldspatos alcalinos, pequenas quantidades de plagioclásio rico em sódio e teores de quartzo menores que 5%. Isso ocorre porque os sienitos são subsaturados de sílica, contendo feldspatóides, sendo o mais comum a nefelina, em substituição ao quartzo, formando principalmente a nefelina sienito. Os sienitos geralmente contém minerais máficos, que podem chegar a teores entre 10 e 35% sendo os mais comuns a hornblenda, piroxênio (silicatos associados com magnésio-ferro, sódio ou cálcio-sódio) e também a biotita (formada por folhas de silicatos, de cor escura) (WINTER, 2014).

Desta forma, a rocha nefelina sienito é, normalmente, composta por minerais como a nefelina, o feldspato de sódio, o feldspato alcalino e piroxênios, que somam aproximadamente 90% da sua composição, sem nenhuma sílica livre (BAGANI *et al.*, 2021; JENA *et al.*, 2014; MCLEMORE, 2009; MOHAMMED *et al.* 2014). O Quadro 2 apresenta os principais minerais encontrados na nefelina sienito.

Quadro 2 – Principais minerais encontrados na nefelina sienito.

Mineral	Fórmula química	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
Nefelina	(Na,K)AlSiO <sub>4</sub>	x	x	x	x	x	x	x
Feldspato Alcalino	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	x	x	x	x	x	x	x
Feldspato de Sódio	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	x	-	x	x	x	x	-
Anortita	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	-	x	x	-	-	-	x
Biotita	K(Mg,Fe) <sub>3</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>	x	x	-	x	-	-	x
Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	x	x	-	x	-	-	-
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	x	-	x	-	-	-	x

Fonte: Autor (2024).

Nota: [1] Silva *et al.* (2020); [2] Jena *et al.* (2014); [3] Bagani *et al.* (2021); [4] Wang *et al.* (2021); [5] Mohammed *et al.* (2014); [6] Salem *et al.*, 2009, [7] Jiang *et al.*, 2023.

Em relação aos óxidos presentes na nefelina sienito, tipicamente tem-se uma concentração de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  menor que 20%,  $\text{SiO}_2$  menor que 60%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  menor que 2% e álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) maior que 15% (MCLEMORE, 2009). A Tabela 1 apresenta algumas composições químicas para a rocha nefelina sienito, em diferentes países.

Tabela 1 – Principais óxidos encontrados na nefelina sienito, em porcentagem.

Fonte	País	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	Outros
Bagani <i>et al.</i> (2021)	SE	54,8	22,2	9,3	6,4	0,7	1,0	5,6
Burat <i>et al.</i> (2006)	TR	67,4	16,9	4,4	6,8	1,4	1,0	2,1
Cruz <i>et al.</i> (2018)	BR	58,7	18,1	0,6	13,9	4,9	0,2	3,6
Esposito <i>et al.</i> (2005)	IT	60,1	23,5	10,4	5,0	0,1	0,4	0,5
Jena <i>et al.</i> (2014)	IN	55,5	19,9	11,1	5,4	2,8	3,8	1,5
Mclemore (2009)	RU	54,0	21,0	9,5	5,3	2,6	1,8	5,8
Mclemore (2009)	CA	54,7	20,9	6,3	7,2	2,4	0,6	7,9
Mohammed <i>et al.</i> (2014)	BE	55,2	24,2	8,3	9,1	0,2	1,6	1,4
Salem <i>et al.</i> (2009)	IR	60,1	23,5	10,4	5,0	0,1	0,4	0,5
Silva <i>et al.</i> (2020)	NO	53,2	22,0	7,3	8,1	3,2	2,9	3,3
Volkman (2004)	BR	57,3	22,7	10,4	5,2	2,0	0,5	1,9

Fonte: Autor (2024).

### 2.2.2 Principais mercados consumidores

A nefelina sienito é amplamente utilizada na produção de vidros e cerâmicas devido aos teores elevados de álcalis e alumina. Os álcalis favorecem o processo de vitrificação, resultando na redução das temperaturas necessárias e, conseqüentemente, no consumo de combustíveis. Além disso, melhoram a capacidade fluxante e diminuem a fusibilidade. Já a alumina confere aos produtos um aumento da resistência química e promove maior durabilidade e dureza às peças (CRUZ, *et al.*, 2018; SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2008; ESPOSITO *et al.*, 2005).

No entanto, para que a nefelina sienito possa ser utilizada pelas indústrias ceramistas e vidreiras, o material deve apresentar baixa granulometria, sendo requerido o tamanho inferior a 0,600 mm para a produção de vidros e 0,075 mm para cerâmicas. Outro fator importante, para que seja possível o seu aproveitamento comercial, é possuir, em geral, menos de 2% de minerais ferromagnesianos (magnetita, biotita, hornblenda e clinopiroxênio), devendo ser menor que 0,08% para

alguns vidros e cerâmicas, pois alteram a alvura necessária para as peças. É desejável, também, que haja ausência de coríndon ou outros elementos, que possuam elevada temperatura de fusão e promova imperfeições nos produtos (BURAT; CANGAL; ONAL, 2006; MCLEMORE, 2009; SILVA *et al.*, 2020).

No Brasil, a principal aplicação para a nefelina sienito tem sido para a produção de produtos cerâmicos, em especial na substituição de feldspatos e fonólitos. Esta aplicação pode representar até 60% da mistura para alguns porcelanatos, estando presente também na composição de alguns esmaltes cerâmicos, conferindo vantagens técnicas e econômicas para estes produtos (CRUZ *et al.*, 2018; SALEM *et al.*, 2009; VOLKMANN, 2004).

As maiores reservas mundiais de nefelina sienito, comercializadas para uso em cerâmicas e vidros, estão localizadas em Ontário (Canadá) e Cabo Norte (Noruega). No entanto, a maior produção mundial da nefelina sienito pertence a quatro jazidas localizadas na Rússia, sendo beneficiada para produção de alumina e subprodutos como o sódio, potássio e cimento Portland. As jazidas da Rússia não são adequadas para as indústrias ceramistas e vidreiras, devido a maior concentração de óxido de ferro (MCLEMORE, 2009). O mesmo acontece com as jazidas da Arábia Saudita, Egito e Finlândia, que apresentam concentração de  $Fe_2O_3$  maior que 6% e limitam sua aplicação (ABOUZEID; NEGM, 2014; JENA *et al.*, 2014; MCLEMORE, 2009).

Outros usos para a nefelina sienito, como pigmentação e cargas para tintas, tem sido exploradas por apresentar vantagens como alvura elevada, ausência de reatividade e maior facilidade de formular e aplicar, mas pode também ser usada na fabricação de alguns polímeros, como carga para espumas, reduzindo a densidade dos compostos em relação ao uso do carbonato de cálcio ou do talco (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2008; SILVA *et al.*, 2020).

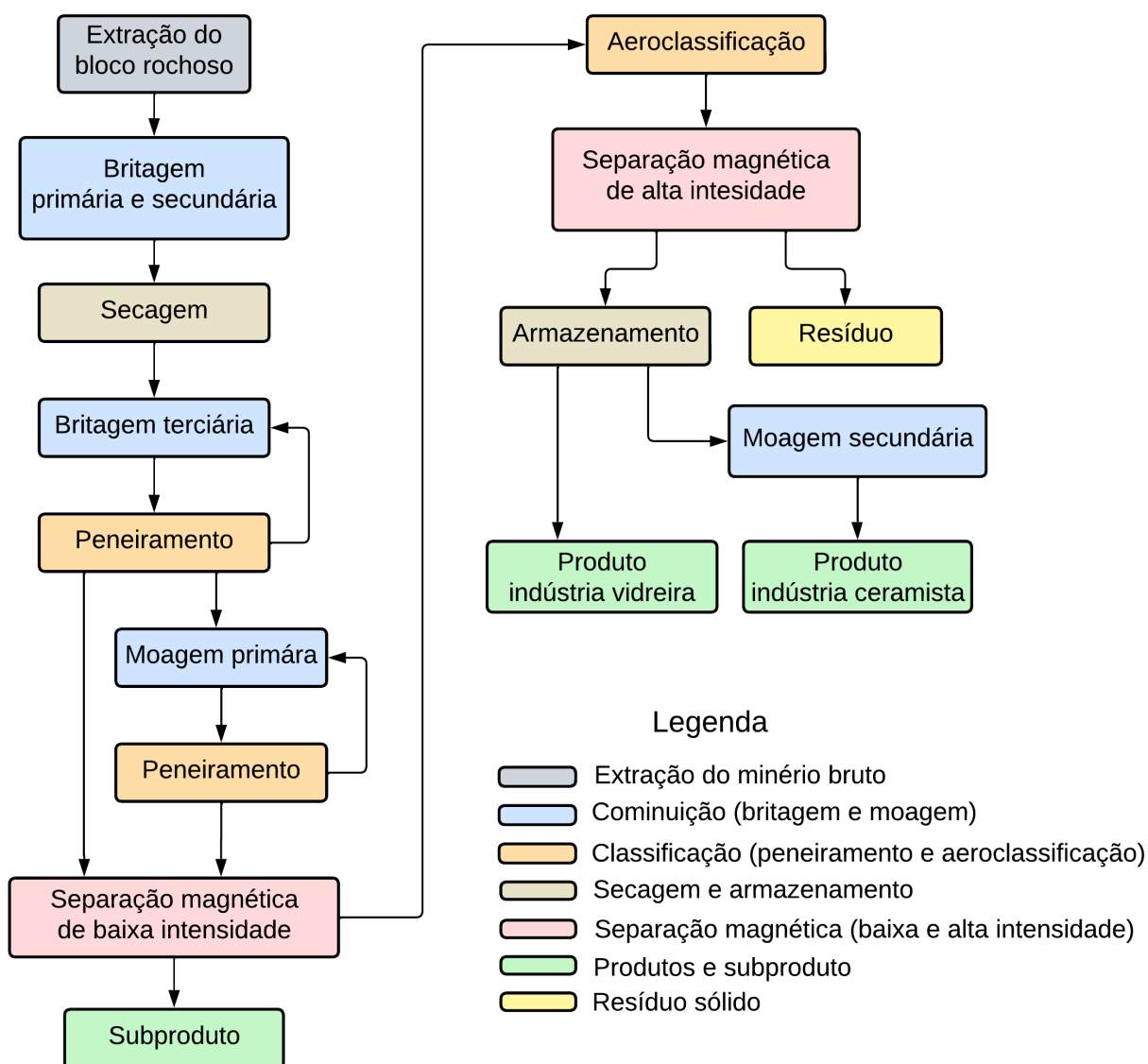
Ocorre, também, a utilização da nefelina sienito como fonte alternativa para o desenvolvimento de alumina (BAGANI *et al.*, 2021; MCLEMORE, 2009), potássio (JENA *et al.*, 2014; MCLEMORE, 2009) ou mesmo de elementos como o nióbio ou de terras raras (ZOZULYA *et al.* 2019; WANG *et al.*, 2021).

No entanto, a nefelina sienito pode, ainda, ser utilizada na agricultura como fonte de fertilizantes, principalmente o potássio, para nutrição das plantas. O uso da nefelina sienito na agricultura se deve pela alta demanda pelo potássio, que possui pouca oferta a nível mundial, e pelo custo elevado dos fertilizantes convencionais (CHIWONA *et al.*, 2020; NOGUEIRA *et al.*, 2021; MOHAMMED *et al.*, 2014).

### 2.2.3 Processo de beneficiamento da rocha

O processo de beneficiamento da rocha nefelina sienito, apresentado de forma esquemática na Figura 3, normalmente ocorre via seca e se inicia com a extração do bloco rochoso, de forma mais recorrente por meio da dinamitação, em formatos cúbicos e com tamanhos de 1,0 m a 1,2 m de aresta. Esses blocos, conhecidos como minério bruto ou ROM (*Run Of Mine*), são transportados por caminhões até a planta industrial e despejados no alimentador. Ocorre então a britagem primária por britador do tipo mandíbulas, com abertura de 180 mm, seguido de britagem secundária, por meio de um britador cônico, com abertura de 50 mm.

Figura 3 – Fluxograma do processo de beneficiamento da nefelina sienito.



Fonte: Autor (2024).

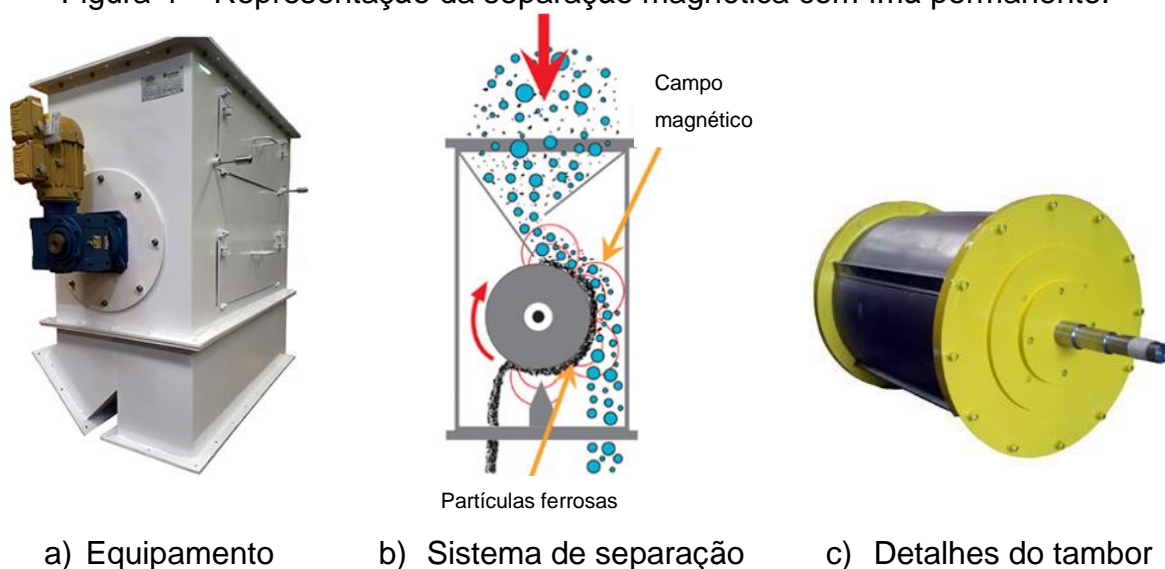
A partir deste ponto, inicia-se o processo de secagem para remoção do excesso de água livre, em um secador rotativo. Esses materiais seguem em correias transportadoras, sendo depositados em pilhas ou silos. Para o ajuste do tamanho inicial de interesse, os materiais são novamente reprocessados.

Nesta etapa são obtidos três tamanhos de partículas. Os materiais mais grosseiros retornam por correias transportadoras ao britador terciário, cônico ou de impacto, a fração intermediária é destinada a um moinho primário e a fração mais fina segue para a próxima etapa de beneficiamento. Esse ciclo se repete até que todo o material seja inferior a 1,18 mm.

A fração mineral de tamanho adequado é então direcionada para um separador magnético de baixa intensidade, capaz de remover qualquer material fortemente magnético. Embora o teor de óxido de ferro seja, normalmente, inferior a 2% na nefelina sienito, o material resultante da separação magnética é identificado como um subproduto (denominado como magnetita) e comercializado pela mineradora.

Para o processo de separação das frações magnéticas presentes nas rochas, inclusive na nefelina sienito, as indústrias utilizam tambores magnéticos e eletromagnéticos. Em ambos, o processo de beneficiamento ocorre devido à ação de um campo magnético, de baixa ou alta intensidade, gerado pela passagem de corrente elétrica (eletromagnéticos) ou por ímãs permanentes (magnéticos). O processo de separação magnética é ilustrado na Figura 4, destacando o equipamento, o sistema de separação e o tambor com ímã permanente.

Figura 4 – Representação da separação magnética com ímã permanente.

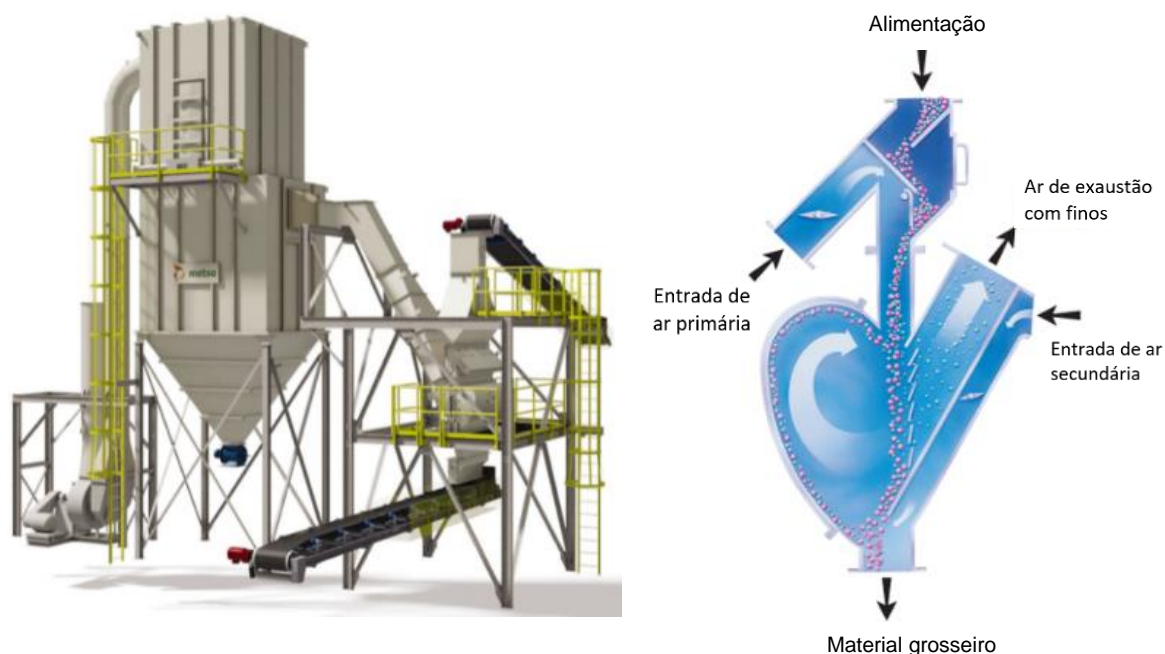


Como vantagens dos ímãs permanentes, ou ímãs magnéticos, pode-se citar o não consumo de energia elétrica, a baixa manutenção e a força magnética constante ao longo do tempo, reduzindo assim os custos e fazendo este modelo ser um dos mais utilizados pelas mineradoras.

Ao lançar o material no equipamento de separação por magnetismo, a presença de aletas internas direciona as partículas dos materiais, fazendo com que se choquem contra o tambor de ímã permanente. O circuito magnético, localizado no interior do tambor, captura a fração magnética e como o tambor gira continuamente, as saliências presentes arrastam a fração metálica para fora do campo magnético que é descarregado por uma abertura, separadamente da fração de interesse.

As frações não magnéticas caem livremente para um ponto de descarga em correias transportadoras, dando continuidade ao processo de beneficiamento, pois ainda não podem ser consideradas adequadas, e retornam para o processo, seguindo para um classificador gravitacional a ar ou aeroclassificador, ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Sistema de separação de partículas por aeroclassificador.



a) Sistema de aeroclassificação

b) Detalhes da aeroclassificação

Fonte: Metso:Outotec (2022).

Nos aeroclassificadores, há um sistema de exaustão que empurra as partículas mais finas, podendo ser canalizadas em silos ou transportadas e dispostas em pilhas. Já as partículas maiores e mais pesadas caem livremente, sendo transportadas por

correias. Desta forma, o aeroclassificador a seco separa com eficiência materiais finos, menores que 0,100 mm, auxiliando na redução de poeira na área industrial ou da presença de materiais finos aderidos nas partículas do material de interesse.

Saindo do aeroclassificador, os materiais passam por um novo processo de separação magnética, com rolos magnéticos ou eletromagnéticos, mas de alta intensidade capaz de remover materiais mesmo que fracamente magnéticos. A fração não magnética, resultante desta separação, deve possuir um teor de óxido de ferro inferior a 0,08% e dará origem aos principais produtos comerciais da nefelina sienito.

Já a parcela que ainda contém materiais magnéticos é denominada pela empresa como a fração ferrosa da desferretização final. Este material granular, com presença de fração ferrosa e de coloração escura, é o principal resíduo da nefelina sienito, sendo o objeto de estudo desta tese, e tem sido depositado na forma de pilhas em áreas de aterros. Há também outro resíduo, com menor teor de geração, mais fino e proveniente da aeroclassificação.

A fração de interesse comercial da nefelina sienito, obtida após a separação magnética final, é então peneirada para garantir um tamanho de partícula adequado. Esse material de baixa granulometria (menor que 0,600 mm) e reduzido teor de óxido de ferro (menor que 0,08%), representa o primeiro produto da nefelina sienito, sendo adequado para indústrias vidreiras. Contudo, pode ser novamente beneficiado, formando um segundo produto destinado ao setor da indústria ceramista. Para isso, o material deve ser novamente cominuído até que se atinja partículas com tamanho inferior a 0,075 mm e teor de óxido de ferro abaixo de 0,08%.

Desta forma, após sucessivos processos de beneficiamento, uma parcela da rocha é comercializada como subproduto, vendida como minério de ferro (magnetita), e a maior fração, não magnética, é comercializada como nefelina sienito sendo extremamente fina, com baixo teor de óxido de ferro e com alto padrão de alvura. Os produtos comerciais podem apresentar diferentes graus de pureza e, por isso, são frequentemente formados a partir de misturas ou *blends*. Uma última parcela, de aproximadamente 25% da rocha bruta, referente aos resíduos sólidos, tem sido descartada em áreas de aterro como rejeitos.

Este estudo concentrou esforços para desenvolver, preliminarmente, rotas de valorização desta fração residual grosseira final, portadora de óxido de ferro e de baixa alvura, visando o seu uso, principalmente, como componente funcional no desenvolvimento de argamassas e concretos.

## 2.3 ECONOMIA CIRCULAR E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS

O conceito de economia circular foi proposto como uma alternativa de resposta ao sistema convencional, e insustentável, da economia linear baseada em extrair, transformar, usar e descartar/desperdiçar. É, também, uma estratégia que busca solucionar o grande desafio da escassez de recursos naturais e o descarte de resíduos, onde do ponto de vista econômico deve haver um sistema ganha-ganha para se tornar atrativo (HOMRICH *et al.*, 2017; TAN; TAN; RAMAKRISHNA, 2022).

Quando se fala em economia circular diferentes termos estão frequentemente relacionados como: gerenciamento de recursos, gestão de resíduos, sustentabilidade, *ecodesign*, produção mais limpa, eficiência energética, ecologia industrial, economia fechada,ecoinovação, design regenerativo, simbiose industrial, reduzir, reutilizar, reciclar, remanufaturar, ciclo de vida, vida útil, desperdícios, resíduos, rejeitos, impactos ambientais, mudanças climáticas, economia berço ao berço, dentre outros.

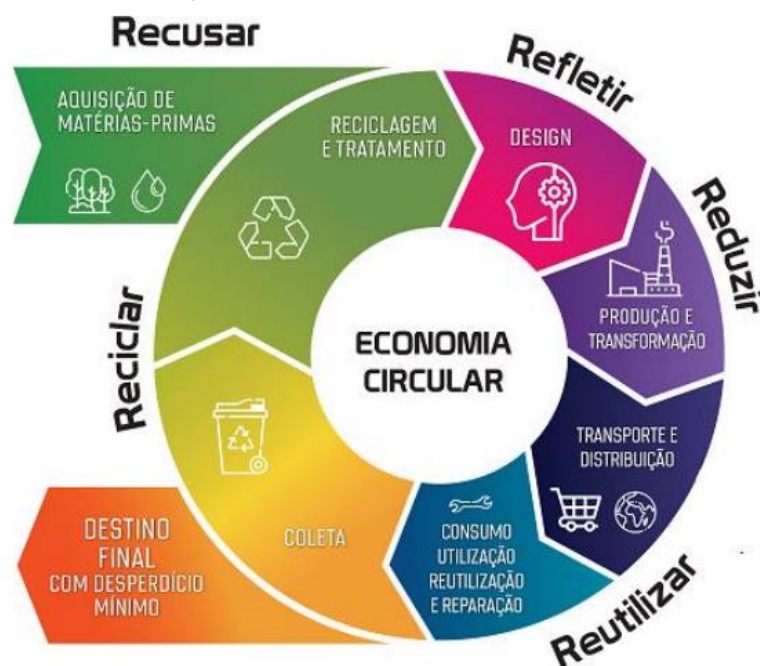
A economia circular vai além do sistema conhecido como 3R's (Reduzir, Reutilizar e Reciclar) e busca restaurar o ciclo dos materiais, mantendo-os atrativos em seus diversos pontos de vida útil, em uma economia de berço-a-berço ao invés da economia do berço ao túmulo. Ela é baseada em um *loop* constante, fazendo com que o fim de um ciclo seja também o ponto de partida de um novo ciclo. Assim, as frações residuais de um ciclo (como sobras e descartes), passam a ser fonte de matérias-primas essenciais (GOVINDAN; HASANAGIC, 2018; KRISTOFFERSEN *et al.*, 2020).

A Figura 6 ilustra o conceito para o modelo de economia circular. É possível perceber a inclusão de mais dois R's ao sistema (Recusar e Refletir), que aparecem propositalmente antes do processo de transformação das matérias-primas, indicando a necessidade em se pensar estratégias mais adequadas para os insumos.

O termo "Recusar" refere-se a prática de evitar o consumo, de forma integral, de matérias-primas que sejam provenientes da extração de recursos naturais não renováveis, dando lugar ao uso de materiais reciclados ou resíduos.

Já o termo "Refletir" aborda o conceito de desempenho dos materiais, o aumento de sua vida útil e o seu ciclo de vida, mas também com o uso de materiais e energias sustentáveis, construindo o *design* do produto de forma mais adequada ao processo e de modo a facilitar sua reintrodução na cadeia.

Figura 6 – Representação em *loop* para o conceito de economia circular.



Fonte: Adaptado de Interbio (2022).

Para que este modelo seja efetivamente viável, é preciso que funcione como um modelo de negócios, obtendo resultados favoráveis ao estabelecer fluxos de materiais e energia. Na fabricação, utilizando um circuito fechado, é crucial planejar o *design* do produto circular, levando em consideração todo o processo produtivo para viabilizar a sua contínua reutilização (KIRCHHERR *et al.*, 2018; LIEDER *et al.*, 2017).

No entanto, há muitos desafios para que seja possível a recuperação de recursos provenientes dos resíduos, devido às atuais práticas de gerenciamento, podendo, inclusive, haver a necessidade de novos sistemas de devolução e coleta, para que seja viável a reinserção dos materiais no ciclo, como fonte de matérias-primas (SALMENPERA *et al.*, 2021; SINGH; ORDONEZ, 2016).

Fellner *et al.* (2017) relatam que a redução da necessidade de matérias-primas virgens por meio da reciclagem ainda é limitada. Para Salmenpera *et al.* (2021), a prevenção do desperdício, ocasionada pela reutilização ou remanufatura, não representa o atual modelo para a gestão de resíduos, mas tem crescido o número de empresas adeptas, e estas atividades servem como transição inicial para os modelos de negócio de uma economia circular. Haas *et al.* (2015) alertam que a dependência da grande quantidade de matérias-primas para geração de energia também é uma forte barreira para promover a circularidade da economia. Estima-se que somente 10% da economia mundial utilize o modelo circular (DE WIT *et al.*, 2018).

O Quadro 3 apresenta as possibilidades que podem ser adotadas como estratégias para alcançar o modelo de economia circular. Além destas, Kristoffersen *et al.* (2020) também abordam outras, com o uso das transformações digitais (indústria 4.0, internet das coisas, *big data* e análise de dados), associando o uso inteligente de recursos digitais com a economia circular. Assim, é possível por meio da criação, extração e processamento de dados das tecnologias digitais, estimular a simbiose industrial como acelerador do processo para alcançar a economia circular, compartilhando informações entre empresas e ações de sucesso implementadas, de modo a serem mais facilmente replicadas.

Quadro 3 – Estratégias para obter avanços para o modelo da economia circular.

Reinventar e repensar
<p>Mudanças e quebra de paradigmas</p> <p><i>Brainstorming</i> – explorar a potencialidade criativa de funcionários e clientes</p> <p>Inovação disruptiva – ruptura com padrões, modelos ou tecnologias já estabelecidas</p> <p>Repensar produtos e processos para a economia circular</p> <p>Valorização da arquitetura conceitual/projeto dos produtos e processos</p> <p>Tempo de vida útil dos produtos</p> <p>Resultados e desempenho – avaliação de custos e benefícios</p> <p>Acesso e disponibilidade de recursos e insumos</p> <p>Logística – volumes de estoques, embalagens e transportes</p>
Recusar e reduzir
<p>Recusar ou evitar o uso de matérias-primas virgens</p> <p>Reduzir excessos e desperdícios – melhorar a eficiência</p> <p>Recusar processos de alto impacto ambiental</p>
Reaproveitar e restaurar
<p>Recircular os materiais – reutilizar e reciclar</p> <p>Reaproveitar os resíduos em outros produtos e processos</p> <p>Reaproveitar os resíduos com fontes energéticas</p> <p>Utilizar técnicas de produção mais limpas</p> <p>Adotar recondicionamento ou remanufatura – aumentar vida útil</p> <p>Promover a simbiose industrial – troca de matérias, energias e informações</p>

Fonte: Adaptado de Kristoffersen *et al.* (2020).

Um estudo realizado para a indústria da construção, analisando dois tipos de materiais para isolamento, sendo um do sistema linear (insumos virgens) e outro da economia circular (resíduos sólidos) mostrou que, por meio da análise de ciclo de vida, o produto manufaturado com resíduos promove significativa redução de impactos, como a emissão total de gás carbônico. No entanto, o processo utilizado em si, já é um grande poluidor, em especial o sistema de transporte (NASIR *et al.*, 2017).

A implementação de estratégias que promovam a economia circular podem necessitar de altos investimentos que podem atuar como entraves para sua instalação nas indústrias, em especial a aversão aos riscos por parte dos líderes empresariais e o favorecimento de lucros de curto prazo. As ações menos onerosas costumam ser as primeiras a serem adotadas pelas empresas, como a recuperação de materiais, reduções de desperdícios e da geração de resíduos, evitando investimentos com a disposição e recuperação de áreas de aterro, tendo retornos financeiros imediatos ou de curto prazo (TAN; TAN; RAMAKRISHNA, 2022; TOMIC; SCHNEIDER, 2020).

Os fatores críticos para o funcionamento de uma economia circular, são os econômicos (viabilidade econômica, custos de investimento, mercado incerto, falta de incentivos, preço mais baixo das matérias-primas virgens), tecnológicos (soluções tecnológicas, habilidades, inovações, plantas pilotos com demonstrações, troca de informações), regulatórios (complexidade das regulamentações, tributações e falta de subsídios, cargas administrativas) e socioculturais (preferências dos clientes, comportamento e conscientização dos cidadãos, aceitação pública, cultura local/regional, valores dos produtos). Ressalta-se ainda a possibilidade da existência de condições e restrições específicas locais, e que esses fatores geralmente ocorrem combinados (DE JESUS; MENDONÇA, 2018; PIETZSCH; RIBEIRO; DE MEDEIROS, 2017; SALMENPERA *et al.*, 2021; TAN; TAN; RAMAKRISHNA, 2022).

Segundo uma pesquisa realizada com 99 empresas pelo Comitê Técnico de Desenvolvimento e Transformação Mineral (MME, 2021), 43 delas demonstraram foco para o desenvolvimento da economia circular. Analisando as três principais estratégias relatadas, 26% das empresas adotariam o beneficiamento e purificação de resíduos, 23% o aproveitamento de resíduos de mineração como fonte de agrominerais e 19% em tecnologias de remanufatura. Esse resultado mostra que, aproximadamente, 50% das principais estratégias das empresas estão relacionadas com os resíduos industriais. A pesquisa listou ainda algumas ações, apresentadas no Quadro 4, que as empresas relataram para se alcançar a economia circular.

Quadro 4 – Ações relatadas por empresas para o avanço da economia circular.

<b>Estímulo e gestão para economia circular</b>
Cálculo de circularidade de materiais, processos e produtos
Reciclagem de ímãs pós-consumo
Regulamentação de coprodutos
Estímulo a logística reversa
Identificação dos materiais críticos com potencial de mineração urbana
Mapeamento de minerais nos resíduos
<b>Melhoria no aproveitamento de resíduos</b>
Agregação de valor no aproveitamento de magnetita obtida como subproduto
Produção de enxofre elementar a partir dos resíduos de carvão
Aproveitamento de subprodutos da mineração como remineralizadores de solos
Produção de materiais cerâmicos a partir dos pegmatitos
Desenvolvimento de rotas de aproveitamento de resíduos
Produção de produtos cerâmicos para construção civil com resíduos de granito

Fonte: Adaptado de MME (2021).

Embora as quantidades elevadas de resíduos sólidos, gerados pelos processos industriais, representem um sério problema, esses mesmos materiais oferecem uma oportunidade como solução para a grande necessidade de recursos e matérias-primas dos diferentes setores da economia. No entanto, autores como Aleluia e Ferrão (2017) e Khan *et al.* (2016), alertam sobre essa abordagem como a solução do problema. Para eles, a prática do uso dos resíduos como fonte de matérias-primas é insustentável a longo prazo, pois o uso contínuo promoverá sua escassez.

Assim, o que se deve buscar é uma viabilidade para os resíduos, de forma técnica, ambiental e econômica, dentro de um intervalo de tempo aceitável, mas devendo existir a integração com outras estratégias para se alcançar, de forma efetiva, o modelo de economia circular.

A valorização do resíduo da nefelina sienito é uma estratégia de transição da economia linear para a circular, por meio da busca de novas soluções e inovações para esta fração residual. Espera-se que este material possa retornar a processos como fonte de recursos minerais valiosos para outros setores, como o da construção civil, por meio de interações entre características potenciais do resíduo e o seu desempenho de propriedades no produto de aplicação (argamassas e concretos).

### 3 MATERIAIS

#### 3.1 AGREGADOS

Os agregados naturais, miúdo e graúdo, utilizados neste estudo como insumos minerais para o desenvolvimento das argamassas e concretos, foram o agregado miúdo natural (AMN) e o agregado graúdo natural (AGN). Ambos foram obtidos de um depósito de materiais de construção em Criciúma, provenientes da região sul do estado de Santa Catarina, onde há grande disponibilidade. O AMN é oriundo de leito de rio e comercializado como areia média lavada, enquanto o AGN é proveniente da rocha ígnea basáltica, comercializado como brita 1. Os agregados naturais foram coletados de acordo com as recomendações da NBR 16915 (ABNT, 2021).

Proveniente da etapa de desferretização final da rocha nefelina sienito (NS), o resíduo da nefelina sienito (RNS) foi coletado na área de estocagem com o auxílio da empresa mineradora e transportado até o laboratório, em um recipiente do tipo *big bag*. O material foi então homogeneizado e seco em estufa, e para uso em matrizes cimentícias foi denominado como agregado do resíduo da nefelina sienito (ARNS).

Os agregados, apresentados na Figura 7, foram preparados de acordo com os procedimentos da NBR 16915 (ABNT, 2021), sendo as amostras reduzidas, primeiramente, por coleta em pontos aleatórios na pilha em forma de tronco cone, em seguida homogeneizadas em betoneira por 5 min e, por fim, separada a fração de interesse por quarteamento. As amostras foram secas em estufa a  $105 \pm 5$  °C por 24 h e acondicionadas hermeticamente em bombonas plásticas em local adequado.

Figura 7 – Imagens dos materiais utilizados como agregados AMN, AGN e ARNS.



Fonte: Autor (2024).

### 3.2 LIGANTES

Para o desenvolvimento das argamassas, o cimento utilizado foi o CP II-F-32, e para os concretos, o CP V-ARI-RS (CP V). A definição destes ligantes foi estabelecida com base no maior teor de clínquer em relação aos demais tipos, favorecendo análises sobre a influência do RNS nas matrizes cimentícias. Os ligantes foram obtidos em loja de materiais de construção no município de Criciúma. Os parâmetros físicos e químicos dos ligantes, apresentados na Tabela 2, foram fornecidos pelos fabricantes, com exceção da massa específica e massa unitária, que foram obtidas experimentalmente de acordo com procedimentos normativos.

Tabela 2 – Parâmetros físicos e químicos dos cimentos Portland utilizados.

<b>Parâmetros</b>	<b>CP II-F-32</b>	<b>CP V</b>
CaO (%)	60,06	58,51
MgO (%)	-	5,05
SiO <sub>2</sub> (%)	11,89	19,14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,93	4,26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,67	3,65
K <sub>2</sub> O (%)	-	0,86
SO <sub>3</sub> (%)	2,81	3,97
Outros (%)	0,99	0,49
Perda ao fogo (%)	14,65	4,07
Resíduo na peneira de 75 µm (%)	0,20	0,10
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,04	3,00
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,13	1,09

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

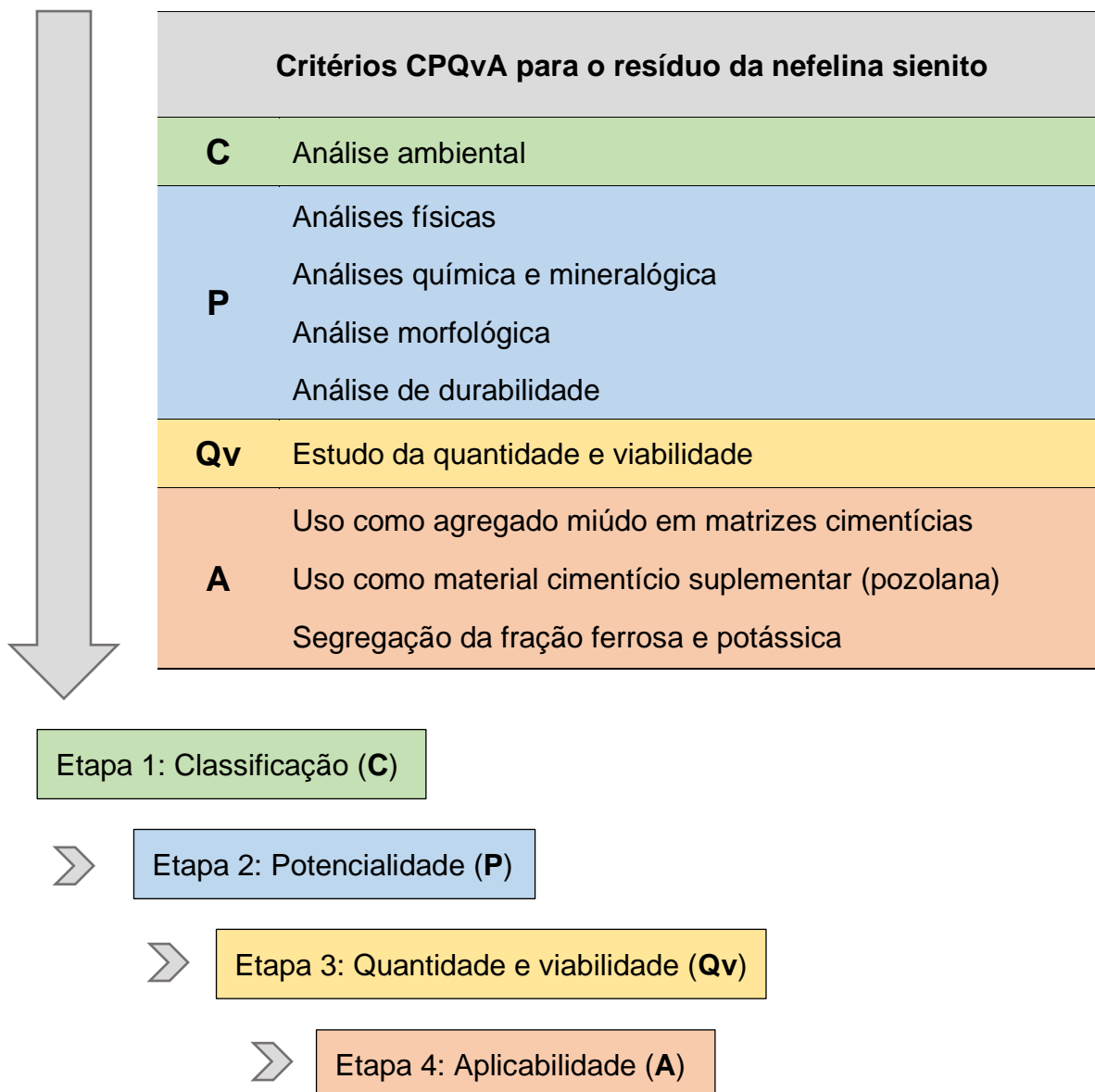
### 3.3 ADITIVOS PLASTIFICANTES

Para o desenvolvimento dos concretos foram utilizados dois diferentes aditivos plastificantes, com a função de redução da demanda de água. O aditivo 1 foi o Muraplast FK 25, da empresa Camargo Química, à base de lignosulfonatos e dosagem recomendada entre 0,2 e 3,0% sobre a massa do cimento. O aditivo 2 foi o Liga Flow 47, da empresa Liga Química, com formulação à base de policarboxilato e dosagem recomendada entre 0,2 e 1,2% sobre a massa de cimento.

## 4 MÉTODOS

Para a avaliação das estratégias para a valorização do resíduo do beneficiamento da nefelina sienito, a metodologia utilizada neste estudo, conforme apresentado na Figura 8, tem como base o uso dos critérios CPQvA.

Figura 8 – Planejamento experimental utilizando os critérios CPQvA.



Fonte: Autor (2024).

As análises propostas em cada uma das etapas dos critérios CPQvA para o RNS são apresentadas no Quadro 5, indicando as atividades experimentais realizadas. Adicionalmente, os procedimentos do critério Potencialidade (P) também foram investigados para os agregados naturais, de modo a estabelecer correlações entre o resíduo e os materiais usualmente utilizados pela construção civil.

Quadro 5 – Análises e procedimentos adotados para as atividades experimentais.

Análise ambiental	Classificação ambiental (NBR 10004)
Análise física	Distribuição granulométrica (NBR 17054) Teor de material fino (NBR 16973) Massa específica (NBR 16916 e NBR 16917) Massa unitária (NBR 16792) Absorção de água (NBR 16916) Umidade crítica e coeficiente de inchamento (NBR 6467)
Análise química e mineralógica	FRX (Fluorescência de raios X) DRX (Difração de raios X)
Análise morfológica	MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura)
Análise de durabilidade	Cura ao ar (NBR 15261) Cura em solução saturada de cal (NBR 13583) Cura em solução de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (NBR 13583)
Quantidade/viabilidade	Relatórios anuais de mineração e artigos científicos
Uso do RNS como agregado miúdo	Argamassa Dosagem e moldagem dos corpos de prova Relação a/c e consistência (NBR 13276) Densidade fresco e teor de ar (NBR 13278) Densidade endurecido (NBR 13280) Resistência à tração na flexão (NBR 13279) Resistência à compressão (NBR 13279) Análise morfológica por MEV
	Concreto Desenvolvimento das curvas de dosagem Dosagem e moldagem dos corpos de prova Relação a/c e abatimento (NBR 16889) Densidade fresco e teor de ar (NBR 9833) Densidade endurecido (NBR 9778) Absorção de água e vazios (NBR 9778) Resistência à compressão (NBR 5739)
Uso do RNS como MCS	Estudo da eficiência de moagem e ativação mecânica Teste de pozolanicidade com cal (NBR 5751) Teste de pozolanicidade com cimento (NBR 5752) Dosagem e moldagem dos corpos de prova Resistência à compressão (NBR 13279) Análise morfológica por MEV
Uso do RNS em outros setores	Segregação do óxido de ferro por separação magnética Segregação do potássio por tratamento térmico

Fonte: Autor (2024).

Os critérios CPQvA foram propostos por Raupp-Pereira (2006) e consistem em um processo de sistematização para a valorização de resíduos, com ações que direcionem para a efetiva aplicação e sua conseqüente valorização. Os critérios abordam a classificação (C), a potencialidade (P), a quantidade/viabilidade (Qv) e as aplicabilidades (A). Assim, foi conduzida uma avaliação qualitativa, baseada nos critérios CPQvA, para o resíduo do beneficiamento da nefelina sienito e que considera o material como fonte de insumos minerais.

Para os critérios CPQvA, foi adotado “C” como classificação ambiental, a ser obtida de acordo com os procedimentos normativos brasileiros; “P” como a potencialidade, baseada em características minerais e físico-químicas do material (análises físicas, química, mineralógica, morfológica e de durabilidade); “Qv” como a quantidade/viabilidade do resíduo na fonte geradora (por meio de dados coletados); e “A” como aplicabilidades e alternativas para o resíduo da nefelina sienito, tendo como base as análises anteriores e as possibilidades verificadas de maneira experimental.

#### 4.1 CLASSIFICAÇÃO (C)

Para a classificação do RNS, a análise ambiental ocorreu conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 10004 (ABNT, 2004). Para isso, foi realizada a identificação do processo ou atividade industrial que deu origem ao resíduo, bem como de seus principais constituintes e características físico-químicas, adotando o fluxograma e procedimentos normativos que orientam para a determinação da classificação ambiental do resíduo.

#### 4.2 POTENCIALIDADE (P)

##### 4.2.1 Análise física

Como forma de comparar os resultados e determinar possíveis influências das composições e aplicações adotadas, as análises físicas foram realizadas para todos os agregados utilizados (AMN, AGN e ARNS), onde os ensaios, realizados em triplicata, seguiram os procedimentos das normas brasileiras.

Para a determinação da composição granulométrica dos agregados, utilizaram-se os procedimentos estabelecidos na NBR 17054 (ABNT, 2022). Amostras de 500 g para o AMN e para o ARNS e de 1000 g para o AGN, foram colocadas em um agitador

eletromecânico, modelo I-1016-B da marca Pavitest, utilizando uma sequência de peneiras normatizada e uma frequência de vibração de 60 Hz durante 5 min. Ao final, registrou-se a massa retida em cada peneira, determinando, posteriormente, a porcentagem retida acumulada. Como resultado, obteve-se a curva de distribuição do tamanho de partículas, a dimensão máxima característica (DMC) e o módulo de finura.

Os teores de material fino do AMN e do ARNS foram obtidos de acordo com a NBR 16973 (ABNT, 2021), submetendo amostras de 100 g ao procedimento de lavagem em água corrente na peneira de 75  $\mu\text{m}$ . As amostras foram posteriormente secas em estufa a 100 °C por 24 h e as massas finais comparadas com as massas iniciais para determinação, percentual, do teor de material fino.

A massa específica e a absorção de água dos agregados miúdos foram determinadas em conformidade com a NBR 16916 (ABNT, 2021). Foram utilizadas amostras de 500 g, do AMN e do ARNS, na condição saturado de superfície seca, introduzindo-as em um picnômetro e completando o recipiente com água até a marca aferida. Os resultados foram obtidos correlacionando as variações de massa do conjunto e o volume ocupado. De maneira semelhante, a massa específica e a absorção de água do AGN foram executadas de acordo com a NBR 16917 (ABNT, 2021). Foram utilizadas amostras de 500 g do material, também na condição saturado de superfície seca, correlacionando essa massa com os resultados das amostras em pesagem hidrostática e seca em estufa.

As massas unitárias dos agregados (AMN, ARNS e AGN) foram determinadas de acordo com os procedimentos da NBR 16972 (ABNT, 2021), após os materiais serem lançados a uma altura de queda constante de aproximadamente 15 cm. Após o lançamento, as superfícies foram rasadas com uma régua metálica, de forma a regularizar e preencher o volume de um recipiente de 15 L, na condição solta, correlacionando o peso da amostra com o volume ocupado.

Por fim, a umidade crítica e o coeficiente de inchamento médio do AMN e do ARNS foram realizados de acordo com a NBR 6467 (ABNT, 2006), onde amostras dos materiais foram submetidas a diferentes teores de umidade (0%, 0,5%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 7%, 9% e 12%) registrando para cada uma delas a variação da massa e o volume ocupado. Para o ARNS foram acrescentados mais dois teores de umidade, 15 e 20%, devido às características do material para a ocorrência da alteração na declividade da curva.

#### 4.2.2 Análise química e mineralógica

Os materiais foram analisados quimicamente por meio da técnica de fluorescência de raios X (FRX), assim como tiveram sua mineralogia investigada por difração de raios X (DRX). Como preparação, as amostras foram previamente cominuídas em um moinho triturador centrífugo de porcelana, do tipo periquito, com esferas de alumina. Posteriormente, as amostras foram peneiradas de modo que todo o material a ser analisado fosse passante na peneira de 45  $\mu\text{m}$ .

As análises por FRX foram realizadas para os materiais AMN, AGN, NS e RNS, utilizando o EDX 7000 da marca Shimadzu, pelo método semiquantitativo de óxidos para amostras sólidas em pó.

As análises para determinar as composições mineralógicas para os materiais NS e RNS, foram obtidas pela técnica de DRX, utilizando um difratômetro de raios X modelo LabX XRD-6000 da marca Shimadzu, com tubo de raios X de cobre ( $\text{CuK}\alpha$ ), ângulo  $2\theta$  variando de 10 a 80°, taxa de varredura de 0,05°/s, com amostras sólidas em pó. As identificações das fases foram determinadas por meio da comparação dos resultados com os difratogramas contidos em bancos de dados abertos de cristalografia, códigos dos cartões *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS), utilizando o software X'pert HighScore Plus 2.0.

#### 4.2.3 Análise morfológica

Os agregados miúdos utilizados, AMN e ARNS, tiveram sua superfície analisada por microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo EVO 10 da marca Zeiss, as quais tiveram suas superfícies preparadas para serem observadas de forma a revelar aspectos morfológicos dos materiais. Para o recobrimento com ouro, utilizou-se o equipamento Q156R-ES, da marca Quorum.

#### 4.2.4 Análise de durabilidade

A durabilidade das matrizes cimentícias, em relação às variações dimensionais, como retrações ou expansões, que possam ocorrer em diferentes ambientes de cura, foram investigadas com o auxílio de argamassas utilizando o AMN e o ARNS. Para isso, foram moldados 12 corpos de prova prismáticos de cada agregado miúdo, com dimensões de 2,5 cm x 2,5 cm x 28,5 cm, sendo 4 corpos de prova utilizados para

avaliação da variação dimensional em cura ao ar, 4 para cura em solução saturada com cal e 4 para cura em solução de sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

Para o desenvolvimento de todas as argamassas, adotou-se a dosagem de 1:3,2 (cimento: areia normal) e uma relação água/cimento (a/c) de 0,60 bem como os procedimentos descritos na NBR 13583 (ABNT, 2014). A areia normal foi composta pelas quatro frações prescritas na NBR 7214 (ABNT, 2015). Como o ARNS não possui partículas iguais ou superiores a 1,18 mm, a massa correspondente foi igualmente dividida para as outras três frações. A moldagem dos corpos de prova foi efetuada em duas camadas, sendo cada camada adensada com 25 golpes por soquete.

Os procedimentos para a cura em câmara seca, ou cura ao ar, estão descritos na NBR 15261 (ABNT, 2005). Os corpos de prova permaneceram em cura nos moldes por 48 h, sendo posteriormente curados em câmara seca, a  $23 \pm 2$  °C e com umidade relativa do ar de  $50 \pm 5\%$ . A variação dimensional das argamassas foi avaliada por relógio comparador com resolução de 0,001 mm, posicionando os corpos de prova no aparelho sempre na mesma posição. As medições foram realizadas nas idades padronizadas de 3, 7 e 14 dias, e posteriormente a cada 14 dias até a idade de 182 dias, contados a partir da data de moldagem. A medição na idade de 3 dias foi considerada como referência para determinação da variação dimensional.

Já para avaliar as variações dimensionais que ocorrem quando um material é exposto a uma solução agressiva, como a solução de sulfato de sódio, deve-se analisar a diferença em relação a uma cura em solução saturada com cal. Os procedimentos para as curas, em solução saturada com cal e em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  estão estabelecidos na NBR 13583 (ABNT, 2014).

A solução de água saturada com cal foi preparada utilizando 100 g de cal hidratada e o restante de água destilada, até que se complete o volume de 1 L de solução, sendo preparada com um dia de antecedência a sua utilização. A solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  foi preparada de forma similar, com um dia de antecedência, utilizando 100 g de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e o restante de água destilada até que se complete o volume de 1 L de solução. O pH das soluções foram medidos e registrados.

Oito corpos de prova de cada agregado miúdo (AMN e ARNS) foram submetidos a uma cura inicial ao ar por 48 h, ainda nos moldes. Posteriormente, foram desmoldados e curados em solução saturada com cal por 12 dias. Após este período, foram realizadas leituras iniciais das medidas dos corpos de prova, onde a variação das argamassas foi avaliada pelo relógio comparador.

Para a cura final, os corpos de prova foram separados mantendo quatro em cura saturada com cal e os outros quatro em solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , sendo ambos curados em estufa a uma temperatura de  $40 \pm 2$  °C. As leituras das medidas foram realizadas a cada 14 dias, até a idade de 182 dias, contados a partir da data de moldagem, posicionando os corpos de prova sempre na mesma posição.

Durante a realização do ensaio, todos os corpos de prova foram observados quanto a presença de fissuras e intensidade das fissuras, desagregação parcial ou total das barras, bem como quaisquer alterações significativas que merecessem ser relatadas e discutidas.

### 4.3 QUANTIDADE E VIABILIDADE ( $Q_v$ )

Como forma de identificar a viabilidade para o resíduo da nefelina sienito, como insumo mineral para diferentes setores, é crucial que informações sejam obtidas em relação às quantidades de resíduos gerados durante o processo de beneficiamento da nefelina sienito, assim como as projeções de exploração minerais das jazidas. Além disso, foram levantadas informações referentes às demandas de insumos minerais para os setores industriais identificados como potenciais consumidores, sendo eles o da construção civil e da agricultura. Desta forma, informações foram obtidas por meio de dados coletados em relatórios de mineração e artigos científicos.

### 4.4 APLICABILIDADE (A)

#### 4.4.1 **Análise do RNS como agregado miúdo em argamassas**

Para o desenvolvimento das argamassas, foi avaliada a utilização do ARNS em substituição ao AMN, em argamassas de revestimento devido à grande demanda pelo setor da construção civil. Foi adotada a dosagem de 1:3 (cimento: agregado miúdo), em volume. Esta proporção, além de ser comumente utilizada nos canteiros de obras, apresenta características desejáveis entre o ligante hidráulico e o agregado miúdo, conferindo às argamassas propriedades adequadas (CARNEIRO; CINCOTTO, 1999; CARASEK, 2017; SABBATINI, 1986, SANTOS, 2014). De modo a garantir um controle mais rigoroso dos insumos, os volumes foram convertidos e os materiais foram dosados em massa.

As argamassas tiveram como insumos o CP II-F-32, o AMN e/ou o ARNS e a água. O AMN foi substituído pelo ARNS nas proporções de 0, 50 e 100%. Inicialmente, o teor de água foi avaliado experimentalmente de forma a obter uma consistência para a argamassa de referência, com 0% de substituição (A0), em  $260 \pm 5$  mm. Essa relação a/c obtida foi utilizada para as outras dosagens contendo 50% de resíduo (A50) e 100% de resíduo (A100) em substituição ao agregado natural, medindo e registrando as consistências obtidas.

Posteriormente, verificou-se novas dosagens para as substituições de 50% (A50+) e 100% (A100+), utilizando uma maior quantidade de água, de maneira a manter a consistência das argamassas em  $260 \pm 5$  mm. A Tabela 3 apresenta as nomenclaturas e as dosagens adotadas para as argamassas desenvolvidas.

Tabela 3 – Dosagem unitária em massa das argamassas desenvolvidas.

<b>Sigla</b>	<b>ARNS</b>	<b>CP F-32</b>	<b>AMN</b>	<b>ARNS</b>	<b>a/c</b>	<b>consistência</b>
A0	0%	1,00	4,00	0,00	experimental	$260 \pm 5$ mm
A50	50%	1,00	2,00	2,00	igual a A0	a ser medida
A100	100%	1,00	0,00	4,00	igual a A0	a ser medida
A50+	50%	1,00	2,00	2,00	experimental	$260 \pm 5$ mm
A100+	100%	1,00	0,00	4,00	experimental	$260 \pm 5$ mm

Fonte: Autor (2024).

As argamassas foram avaliadas no estado fresco quanto à demanda de água (relação a/c), consistência, densidade de massa e teor de ar. Já no estado endurecido, aos 28 dias, foram avaliadas quanto à densidade de massa e resistências mecânicas à tração na flexão e à compressão.

As argamassas foram preparadas seguindo os procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2016). Utilizando um misturador mecânico de capacidade de 5 L, com movimentos planetários, foram introduzidos na argamassadeira a água e o agregado miúdo, misturando-os em velocidade baixa por 30 s. Posteriormente, foi adicionado o cimento e os materiais foram homogeneizados em velocidade baixa por 60 s. Após esse tempo, as pás e o recipiente foram manualmente raspados com o auxílio de uma espátula, sendo a argamassa novamente misturada por mais 30 s na velocidade baixa, totalizando um tempo de homogeneização dos insumos de 120 s.

De acordo com os procedimentos descritos na NBR 13276 (ABNT, 2016), para avaliação da consistência, as argamassas desenvolvidas foram colocadas em um

molde troncocônico, em alturas aproximadamente iguais, aplicando em cada camada, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com um soquete, distribuídos de forma uniforme na superfície. O excesso de argamassa foi removido realizando o rasamento com régua metálica. Por fim, o molde foi retirado e a manivela da mesa de fluxo acionada, aplicando 30 golpes em 30 s. As consistências das argamassas foram obtidas pela média de três medições, a partir do diâmetro do espalhamento na mesa de fluxo.

Para determinação da densidade no estado fresco e do teor de ar das argamassas, foram adotados os métodos prescritos na NBR 13278 (ABNT, 2005). Assim, um recipiente cilíndrico foi preenchido com as amostras, em duas camadas com alturas aproximadamente iguais. Cada camada foi adensada com o auxílio de uma espátula realizando 20 golpes, correspondentes à entrada e saída vertical da espátula na referida camada. Após o preenchimento completo do recipiente, aplicou-se três quedas com alturas de 3 cm, aproximadamente, sendo a superfície posteriormente rasada com régua metálica para remoção do excesso. As densidades de massa no estado fresco foram obtidas pela divisão da massa das argamassas pelo volume do recipiente, previamente aferido de, aproximadamente, 400 mL.

Os teores de ar das argamassas no estado fresco foram calculados, considerando as densidades de massa obtidas experimentalmente (que apresenta vazios em sua composição), com as densidades de massa teórica das argamassas (que desconsidera a presença de vazios). A densidade teórica foi calculada em função da massa de cada um dos insumos utilizados na dosagem e suas respectivas massas específicas, obtidas previamente.

Para as análises das argamassas no estado endurecido, as argamassas foram preparadas de acordo com os métodos da NBR 13276 (ABNT, 2016). Foram moldados 6 corpos de prova prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm para cada uma das dosagens, sendo introduzidas em duas camadas iguais e adensadas com 20 golpes na mesa de adensamento. Os corpos de prova permaneceram nos moldes por 48 h, mantidos vedados para evitar a perda de água, sendo posteriormente desmoldados e curados ao ar a  $23 \pm 2$  °C até os 28 dias quando foram realizados os ensaios.

Para determinar as densidades de massa das argamassas no estado endurecido, estando os procedimentos estabelecidos na NBR 13280 (ABNT, 2005), os corpos de prova moldados foram pesados e medidos, em relação à altura, largura e comprimento. As densidades foram obtidas pela divisão entre as massas e os volumes das argamassas.

As resistências das argamassas à tração na flexão foram obtidas posicionando os corpos de prova prismáticos no dispositivo de apoio e aplicando um carregamento constante de  $50 \pm 10$  N/s, no centro dos corpos de prova biapoiados, até a ruptura. Já para as resistências à compressão, foi utilizada uma das metades dos corpos de prova prismáticos rompidos à tração na flexão, posicionando-os em um dispositivo de apoio e aplicando um carregamento constante de  $500 \pm 50$  N/s até a ruptura. Estes procedimentos, bem como os dispositivos de apoio, seguiram as recomendações prescritas na NBR 13279 (ABNT, 2005). Os ensaios de resistência mecânica das argamassas à tração na flexão e à compressão, foram realizados aos 28 dias e utilizaram uma prensa da marca Emic, modelo DL 300, com célula de carga de 20 kN para tração na flexão e de 300 kN para a compressão.

De modo a avaliar possíveis alterações na estrutura química e composição das matrizes cimentícias provocadas pela utilização do ARNS, as argamassas A0 e A100 foram observadas por MEV, utilizando um equipamento da marca Zeiss, modelo EVO 10. As argamassas receberam cura submersa por 28 dias e, posteriormente, cortadas em lâminas. As superfícies foram devidamente preparadas recebendo recobrimento com ouro, utilizando o equipamento da marca Quorum e modelo Q156R-ES.

#### **4.4.2 Análise do RNS como agregado miúdo em concretos**

Para a obtenção das dosagens dos concretos, foi adotado o método proposto pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas/Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (IPT/EPUSP) por ser um método essencialmente experimental, que permite realizar ajustes necessários e obter informações sobre acabamento, trabalhabilidade e resistência do concreto. Considera-se este método adequado, pois possibilita a incorporação de novos materiais, como resíduos sólidos, associados às condições de uso em obras e com a utilização de aditivos. A sequência dos procedimentos laboratoriais necessários para a construção do diagrama de dosagem é descrita a seguir e baseia-se nos estudos realizados por Helene e Terzian (1992).

De acordo com este método de dosagem, primeiro fixou-se um traço inicial de referência 1:m (cimento: agregados secos totais) igual a 1:5 e dois traços complementares ( $m \pm 1,5$ ), um mais rico em ligante com uma proporção de 1:3,5; e outro mais pobre em ligante, com uma proporção de 1:6,5, sendo todos dosados em massa. Além destes, foram investigados dois traços adicionais, de modo a obter o

intervalo de dosagem de interesse, sendo eles: 1:2,0 e 1:8,0, considerado super rico e super pobre em ligante, respectivamente.

A relação a/c efetiva, necessária para cada dosagem 1:m, foi obtida experimentalmente, por interações, adotando um valor inicial para a relação a/c igual a 0,50. Como o aditivo utilizado tem a capacidade de reduzir a demanda de água em até 25%, a relação a/c inicial foi ajustada para 0,40, com o uso do aditivo plastificante 1 na proporção de 1,5% em relação a massa de cimento.

Para o desenvolvimento dos concretos, inicialmente a betoneira foi lubrificada ou “imprimada” utilizando uma argamassa. Após, os materiais da dosagem foram introduzidos na betoneira em movimento, na seguinte ordem: 80% da água de amassamento, 100% do agregado graúdo, 100% do ligante, 100% do agregado miúdo, homogeneizando os materiais por 4 min. Foi realizada uma parada intermediária para a raspagem do material aderido nas pás e interior da betoneira. Posteriormente foi acrescentado o aditivo plastificante, diluído com o restante da água (20%), homogeneizando o concreto por mais 4 min.

Com o concreto recém preparado, foi determinado o abatimento pelo método do tronco cone ou *slump test*. Caso o abatimento não estivesse dentro do limite de fluidez estabelecido neste estudo em  $90 \pm 10$  mm, o concreto retornava a betoneira, aumentando a relação a/c conforme necessidade, homogeneizando-o novamente por mais 2 min. As interações se repetiram até que o intervalo de fluidez fosse alcançado.

Os concretos, durante o teste de abatimento do tronco cone, receberam um golpe suave com a haste de adensamento na região da base do concreto (terço inferior) afim de verificar sua coesão e desagregação. A deformação plástica ocasionada pelo golpe indica que o concreto possui alta coesão. Já o cisalhamento indica que o concreto apresenta baixa coesão.

Assim, os concretos foram avaliados, qualitativamente, segundo seu aspecto e classificados como: pouco argamassado e sem/com coesão (A), argamassado e sem coesão (B) e argamassado e coeso (C). A Figura 9 apresenta diferentes aspectos dos concretos representando as três condições. Para aceitação, os concretos deveriam apresentar aspecto argamassado e coeso, relativo à condição C.

Figura 9 – Imagens dos diferentes aspectos dos concretos avaliados.



(a) Condição A

(b) Condição B

(c) Condição C

Fonte: Autor (2024).

Caso o concreto não apresentasse a condição C era necessário alterar o teor de argamassa da dosagem. Para reduzir o número de tentativas necessárias para se obter o teor de argamassa ideal, este estudo levou em consideração os resultados obtidos por Boggio (2007). Segundo o autor, o teor de argamassa adequado para os concretos, após analisar cinco diferentes métodos de dosagem (incluindo o IPT/EPUSP), variam entre 51 e 54%. Desta forma, o teor de argamassa ( $\alpha$ ) iniciou em 50% e caso o concreto não estivesse argamassado e coeso, foram realizadas, experimentalmente, interações de mais 2% de argamassa.

Uma vez obtido o concreto com o abatimento desejado, com teor de argamassa adequado e aspecto argamassado e coeso, uma nova mistura foi realizada devido as redosagens de água. Essa mistura final, além de fornecer a efetiva relação água/cimento e o abatimento para os traços 1:m, foi utilizada para moldagem dos corpos de prova e avaliação das propriedades nos estados fresco e endurecido.

Para a construção do diagrama de dosagem, foram moldados 5 corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm, conforme NBR 5738 (ABNT, 2015), para cada uma das relações de agregados secos totais ( $m=2,0$ ,  $m=3,5$ ,  $m=5,0$ ,  $m=6,5$  e  $m=8,0$ ) e para a idade de 7 dias. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 h e colocados em tanque de água saturada com cal para a realização de cura submersa.

O diagrama de dosagem foi obtido utilizando integralmente o AMN e, com base nas curvas plotadas, foram propostas dosagens para a resistência mecânica à compressão de 25 MPa, aos 7 dias, onde o AMN foi substituído pelo ARNS, alterando também as relações a/c, os tipos de aditivos plastificantes e o teor de aditivos.

Inicialmente o AMN foi substituído, em massa, pelo ARNS nas proporções de 0, 50 e 100%, alterando a relação a/c necessária para manter a fluidez dos concretos

1 (denominado como C1) em  $90 \pm 10$  mm. Os concretos C1 utilizaram o aditivo plastificante 1, à base de lignosulfonatos, com o mesmo teor para todas as dosagens na proporção de 1,5% da massa de cimento. Posteriormente, verificou-se novas dosagens para um concreto 2 (denominado como C2) para os mesmos teores de substituições do agregado miúdo, em 0, 50 e 100%. Para os concretos C2, foi utilizada uma mesma relação a/c, igual a 0,70 e um aditivo plastificante 2, à base de policarboxilatos, investigando a demanda do teor de aditivo necessário para manter a fluidez em  $90 \pm 10$  mm. O aditivo 2 foi dosado em relação a massa de cimento.

Os concretos desenvolvidos foram avaliados no estado fresco quanto a relação a/c, consistência pelo abatimento do tronco cone, massa específica e teor de ar. Já no estado endurecido foram avaliados, aos 7 e 28 dias, em relação à absorção de água, índice de vazios, massa específica e resistência à compressão.

A determinação da consistência dos concretos pelo método do abatimento do tronco cone, foi realizada conforme procedimentos da NBR 16889 (ABNT, 2020). Para isso, um molde troncocônico foi preenchido em três camadas, com alturas aproximadamente iguais, sendo cada camada compactada com 25 golpes por uma haste de adensamento. Com o auxílio de uma colher de pedreiro, foi realizado na superfície do molde, o rasamento para a retirada do excesso de concreto. O molde foi então retirado cuidadosamente na direção vertical e colocado de forma invertida sobre a base da placa. O abatimento do concreto foi obtido comparando a altura do molde com a altura final do concreto.

Os procedimentos para obtenção da massa específica e teor de ar dos concretos estão estabelecidos na NBR 9833 (ABNT, 2008). Após a preparação dos concretos, um recipiente cilíndrico com volume de, aproximadamente, 15 L foi preenchido em três camadas com alturas aproximadamente iguais. Cada camada foi adensada verticalmente com 25 golpes, distribuídos por toda a superfície, por uma haste de adensamento. As paredes externas do molde foram golpeadas 10 vezes, por um martelo de borracha, de modo que fossem retiradas as marcas de compactação pela haste, e o excesso de concreto foi removido da superfície do molde, com o auxílio de uma régua metálica. Para calcular a massa específica dos concretos no estado fresco, dividiu-se a massa do concreto pelo volume do recipiente. Já para a determinação do teor de ar dos concretos, primeiramente calculou-se o rendimento, o volume total dos componentes e o índice de ar, por meio de equações estabelecidas na referida norma, correlacionando-as posteriormente para a obtenção do teor de ar.

Para avaliar as propriedades dos concretos no estado endurecido, foram moldados 13 corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm para cada uma das dosagens estudadas, seguindo os procedimentos estabelecidos na NBR 5738 (ABNT, 2015). Os moldes foram preenchidos em duas camadas com alturas aproximadamente iguais, sendo cada camada compactada com 12 golpes com uma haste de adensamento. O excesso de concreto foi removido com uma régua metálica, realizando o rasamento da superfície. Por fim, os corpos de prova foram vibrados em uma mesa vibratória por 10 s, em uma frequência de vibração de 60 Hz, para remoção parcial dos vazios.

Foram utilizados 10 corpos de prova para determinação da resistência à compressão, sendo 5 para cada idade e 3 corpos de prova para avaliação das propriedades de absorção de água, índice de vazios e massa específica. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 h e colocados em um tanque de água saturada com cal para a realização de cura submersa, por 7 e 28 dias.

Seguindo os critérios experimentais da NBR 9778 (ABNT, 2005), para a determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica, os corpos de prova de concreto foram retirados do tanque de cura, colocados em um cesto imerso em água, determinando suas massas por pesagem hidrostática. Em seguida, foram retirados e secados superficialmente, com o auxílio de panos, pesados e determinadas suas massas na condição saturado de superfície seca. Por fim, foram levados à estufa em uma temperatura de  $105 \pm 5$  °C por 24 h para determinação das suas massas na condição seca em estufa.

A absorção de água foi determinada correlacionando as massas saturadas em água com as massas secas em estufa das amostras. Já o índice de vazios, além dessas duas massas, também leva em consideração a massa das amostras obtidas pela pesagem hidrostática. As massas específicas dos concretos foram determinadas pelas divisões entre as massas dos corpos de prova na condição seca em estufa por seus volumes, calculados pelas medições da altura e diâmetro, em dois pontos distintos, com o auxílio de um paquímetro.

As resistências à compressão dos concretos foram obtidas conforme procedimentos descritos na NBR 5739 (ABNT, 2018). Para tal, os corpos de prova, previamente plainados em retificadora automática da marca Fortest, foram retirados do tanque de cura e imediatamente ensaiados, utilizando uma prensa da marca Emic, modelo universal com sistema 300/2000 e célula de carga de 2.000 kN, aplicando um carregamento constante de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s até a ruptura.

#### 4.4.3 Análise do RNS como material cimentício suplementar

Para verificar a pozolanicidade do RNS e a sua possibilidade de utilização como material cimentício suplementar, duas metodologias foram investigadas, sendo uma com cal hidratada e outra com cimento. Devido a granulometria ser inadequada ao uso proposto, o RNS foi preliminarmente cominuído em um moinho de alta energia, modelo PM100 da Retsch, visando obter um teor de material retido na peneira de 45  $\mu\text{m}$  inferior a 20%, recomendado por normativas brasileiras.

Desse modo, os procedimentos para ativação mecânico-química e aumento da reatividade foram sugeridos e investigados neste estudo. Os parâmetros adotados para o estudo da eficiência de moagem do RNS e desenvolvimento do material cimentício suplementar são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de processamento analisados para a cominuição do RNS.

<b>Parâmetro analisado</b>	<b>Velocidade (rpm)</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Esferas (mm)</b>	<b>Carga (g)</b>
Velocidade de rotação	100	10	100	5	315
	200	10	100	5	315
	300	10	100	5	315
	400	10	100	5	315
	500	10	100	5	315
Tempo do processamento com velocidade de 300 rpm	300	2	100	5	315
	300	3	100	5	315
	300	4	100	5	315
	300	5	100	5	315
	300	8	100	5	315
Tempo do processamento com velocidade de 400 rpm	400	2	100	5	315
	400	3	100	5	315
	400	4	100	5	315
	400	5	100	5	315
	400	8	100	5	315
	400	10	100	5	315

Fonte: Autor (2024).

De modo a investigar a influência na variação da velocidade de rotação e do tempo de moagem na eficiência de cominuição do material, a massa da amostra (100 g), o tamanho das esferas de alumina (5 mm) e a carga de moagem (315 g) foram mantidas constantes para todos os ensaios. Os materiais resultantes da moagem foram analisados em relação à distribuição do tamanho de partículas por granulômetro a laser, modelo Cilas 1064L da marca Acil Weber.

Posteriormente ao estudo dos parâmetros da variação da velocidade de rotação e do tempo de moagem, na eficiência de cominuição do RNS, foi selecionado um material candidato a ser investigado em relação a pozolanicidade, sendo denominado como pozolana do resíduo da nefelina sienito (PRNS).

Seguindo os procedimentos da NBR 5751 (ABNT, 2015) para a verificação da pozolanicidade com cal hidratada, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm. A dosagem das argamassas foi realizada em massa com valores prescritos em norma utilizando 208 g de hidróxido de cálcio e 1872 g de agregado miúdo, onde 468 g correspondiam a cada uma das quatro frações que compõem a areia normal (0,150 mm – 0,300 mm – 0,600 mm – 1,18 mm).

A quantidade da PRNS foi obtida por meio de uma relação matemática prescrita na norma, levando em consideração as densidades do material potencialmente pozolânico e da cal hidratada, totalizando 530 g de PRNS. Por fim, a quantidade de água foi determinada experimentalmente de modo a obter um índice de consistência para a argamassa de  $225 \pm 5$  mm.

A cura foi realizada dentro dos moldes, por 7 dias, sendo o primeiro dia em cura ambiente a  $23 \pm 2$  °C e os demais em temperatura de  $55 \pm 2$  °C, mantidos vedados para evitar perda de água. Após a cura, os corpos de prova foram rompidos à compressão e avaliados se alcançaram a resistência mínima normativa de 6 MPa para classificá-los como pozolânicos.

Para determinar a pozolanicidade do RNS utilizando cimento Portland, a partir do método prescrito na NBR 5752 (ABNT, 2014), foi necessária a utilização de duas argamassas, A e B. A argamassa A utilizou como insumos o CP II-F-32 (624 g), areia normal (1872 g) e água (300 g) enquanto a argamassa B o CP II-F-32 (468 g), que foi substituído parcialmente em 25% pelo material potencialmente pozolânico (156 g), mantendo-se constante as quantidades de areia normal (1872 g) e água (300 g).

Foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm para cada dosagem, A e B. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 h e colocados em

tanque com água para cura submersa até os 28 dias, para determinar a resistência à compressão. O material foi considerado pozolânico se o índice de desempenho, obtido pela divisão da resistência da argamassa B pela A, fosse  $\geq 90\%$ .

Concluída a investigação da atividade pozolânica do RNS, pelos dois métodos utilizados nesta pesquisa, a PRNS foi analisada em diferentes teores de substituição ao cimento CP II-F-32, em massa, nas proporções de 0, 10, 20, 30 e 40%. Para o desenvolvimento das argamassas e moldagem dos corpos de prova, foi utilizada a mesma dosagem estabelecida no método de pozolanidade com cimento, utilizando como insumos o CP II-F-32, a PRNS, a areia normal e a água. As dosagens para as argamassas contendo a PRNS em substituição ao cimento são apresentadas na Tabela 5, onde os demais insumos (AMN e água) foram mantidos constantes.

Tabela 5 – Dosagem unitária em massa para estudo da pozolanidade do RNS.

<b>Sigla</b>	<b>PRNS</b>	<b>CP F-32</b>	<b>PRNS</b>	<b>AMN</b>	<b>a/c</b>
PRNS-0	0%	1,00	0,00	3,00	0,48
PRNS-10	10%	0,90	0,10	3,00	0,48
PRNS-20	20%	0,80	0,20	3,00	0,48
PRNS-30	30%	0,70	0,30	3,00	0,48
PRNS-40	40%	0,60	0,40	3,00	0,48

Fonte: Autor (2024).

Foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm para cada dosagem, permanecendo nos moldes por 24 h e mantidos vedados para evitar perda de água. Posteriormente foram desmoldados e curados em tanque com água para cura submersa até os 28 dias, para determinar a resistência à compressão.

Para avaliar a morfologia da superfície das argamassas e possíveis alterações em sua estrutura química e composição, provocadas pelo uso da PRNS, a argamassa A0 teve o cimento substituído em 40% pela PRNS, sendo denominada como A0<sub>40%</sub>, permitindo, assim, que correlações pudessem ser estabelecidas com a argamassa sem a presença da PRNS, isto é, a A0. As argamassas receberam cura submersa por 28 dias sendo posteriormente cortadas em lâminas e preparadas para serem observadas por MEV, modelo EVO 10 da marca Zeiss e para o recobrimento da amostra com ouro utilizou-se o equipamento da marca Quorum, modelo Q156R-ES.

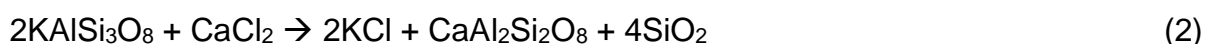
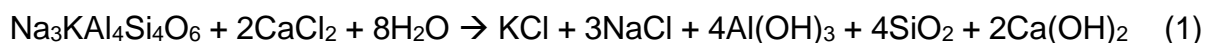
#### 4.4.4 Análise da segregação da fração ferrosa do RNS

Foi avaliada a possibilidade de segregação da fração ferrosa presente no RNS por meio da separação magnética. Iniciou-se pela separação magnética a seco de baixa intensidade utilizando um ímã permanente, modelo SMPA, fabricado pela empresa Ital, com dimensões da superfície da placa de 45 cm x 50 cm e intensidade magnética de 1.500 Gauss. Uma amostra de 1000 g do RNS foi espalhada sobre uma placa plana formando uma fina camada de material. O separador magnético foi, então, colocado sobre a amostra, a uma altura fixa de aproximadamente 5 cm, de forma a criar um campo magnético capaz de capturar as frações magnéticas.

Posteriormente, foi avaliada a separação magnética a úmido de alta intensidade, utilizando uma barra cilíndrica com intensidade magnética de 10.000 Gauss. Para isso, uma amostra de 150 g de RNS foi colocada em um béquer com 1,5 L de água juntamente com um agitador elétrico, de forma que o material permanecesse em suspensão durante todo o ensaio. As partículas aderidas ao ímã foram extraídas a cada 5 min, sendo este procedimento realizado 10 vezes. Em seguida, as frações segregadas foram secas em estufa a 100 °C por 24 h. Os teores percentuais das frações magnéticas obtidas do RNS foram calculados em relação ao material aderido no ímã e à amostra inicial.

#### 4.4.5 Análise da segregação da fração potássica do RNS

Uma amostra do RNS, após moagem preliminar de modo que o material fosse menor que 45 µm, foi uniformemente misturado com cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>), em uma proporção em massa de 1:0,45 (RNS: CaCl<sub>2</sub>). Esse material foi submetido a tratamento térmico, a uma temperatura de, aproximadamente, 900 °C por 30 min, utilizando uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, seguido de resfriamento até temperatura ambiente. Essa metodologia foi adotada de maneira que o processo estabelecido possibilitasse a decomposição do potássio da matriz do RNS, para a formação do cloreto de potássio (KCl). Algumas das possíveis reações envolvidas no processo são apresentadas nas equações 1, 2 e 3.



O material resultante do tratamento térmico foi lixiviado em água destilada a 40 °C por 15 min, em uma proporção de sólidos/líquidos de 1/10 e, posteriormente, filtrado. A fração não lixiviada foi seca em estufa a 100 °C por 24 h. Para determinar a eficácia da segregação da fração potássica, as amostras sólidas, antes e depois do tratamento, foram analisadas por ICP-OES, modelo Optima 8300 da Perkin Elme.

Para isso, foi necessário realizar a digestão das amostras sólidas, utilizando uma digestão de ácido assistida por micro-ondas, modelo *Multiwave Pro* da marca Anton Paar. Foi adotado o ácido nítrico concentrado em uma proporção de 10 mL para cada 0,200 g de amostra, sendo a solução aquecida a 175 °C por 10 min, seguido de resfriamento controlado até atingir temperatura ambiente. O teor percentual de potássio foi calculado pela razão entre a quantidade existente nas amostras, antes e depois do processamento utilizado.

A metodologia adotada para o tratamento térmico do RNS com  $\text{CaCl}_2$ , foi baseada nos procedimentos e resultados experimentais obtidos na literatura pelos autores Jena *et al.* (2014) e Mazumder, Sharma e Rao (1993).

#### 4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Os resultados deste estudo foram analisados por tratamento estatístico como os cálculos da média, variância e desvio padrão. Os resultados das argamassas e concretos também foram observados quanto ao teste de Análise de Variância (ANOVA). Adicionalmente, as argamassas foram analisadas pelo gráfico de Pareto.

A ANOVA foi utilizada por ser adequada para analisar desvios padrões iguais e dados distribuídos uniformemente (distribuição normal), verificando se há diferenças significativas entre as médias observadas. O nível de significância ( $\alpha$ ) adotado foi igual a 0,05. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi aplicado a ANOVA, de modo a identificar o quanto os resultados poderiam ser explicados pelo modelo, variando de 0 a 1, onde o valor 1 indica que o modelo explica totalmente a variação.

Já a análise pelo gráfico de Pareto foi utilizada pela facilidade de identificar quais eram os principais fatores que contribuíram para a alteração nas propriedades investigadas. No gráfico de Pareto, as alturas das barras representam a magnitude da influência dos fatores, ou da combinação dos fatores, nas propriedades, assim como os sinais dos gráficos, positivos ou negativos, podem indicar se os fatores contribuem para aumento ou redução das propriedades.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CLASSIFICAÇÃO (C)

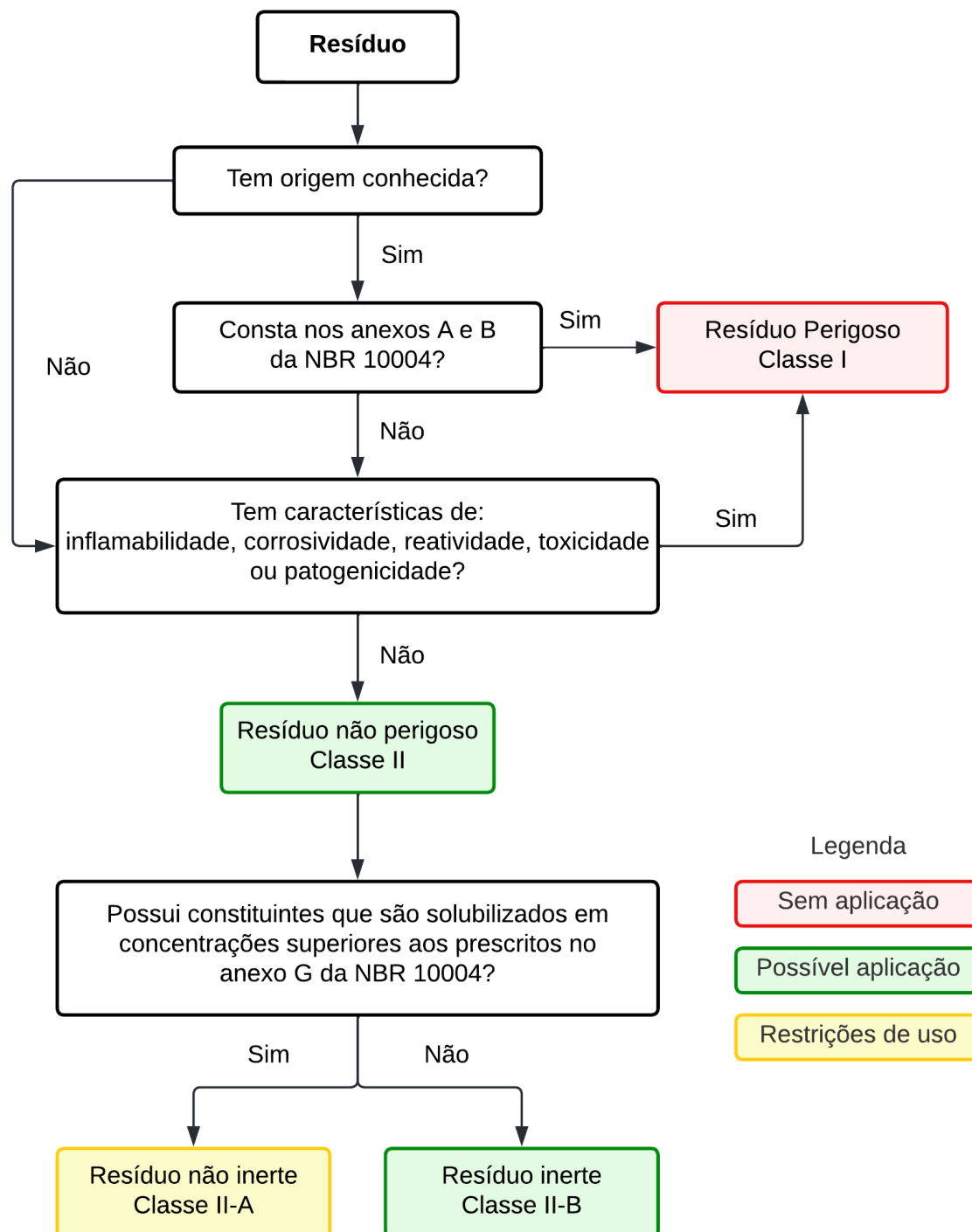
A classificação ambiental do RNS iniciou com a identificação do processo e da atividade que lhe deu origem, detalhando como ocorreu a sua segregação na fonte geradora. Foram identificados os seus constituintes mineralógicos e características físico-químicas, de modo a compará-los com outros resíduos e substâncias nocivas já conhecidos e prescritos em norma. Essas informações sobre a nefelina sienito foram apresentadas de forma detalhada no capítulo de revisão (ver capítulo 2.2). No entanto, são novamente descritas aqui, mas de maneira sucinta, de forma a facilitar a classificação ambiental do RNS.

O processo de beneficiamento da nefelina sienito ocorre por via seca e consiste, basicamente, de um conjunto de procedimentos que promovem a cominuição da rocha (por meio de diferentes britadores e moinhos), separações dos tamanhos das partículas (por peneiramento e por aeroclassificadores) e separações magnéticas (por ímãs permanentes de baixa e alta intensidade). Desta forma, o material de origem é processado e beneficiado até que se obtenha partículas de tamanhos adequados e constituintes mineralógicos desejáveis, sendo o RNS correspondente à fração obtida na última separação magnética, portadora de minerais máficos e sem valor comercial.

Em relação aos seus constituintes, a rocha nefelina sienito pertence ao grupo dos feldspatóides, contendo majoritariamente os elementos alumínio, silício e oxigênio (aluminossilicatos) associados ao sódio e potássio. Quando o teor de sílica é mais baixo do que o necessário para formar o quartzo e há presença de minerais ferromagnesianos, a NS se forma pelo resfriamento do magma apresentando uma textura do tipo granítica. A NS é, normalmente, composta por minerais como a nefelina, o feldspato de sódio, o feldspato de potássio e piroxênios, que somam aproximadamente 90% da sua composição.

Para a classificação ambiental dos resíduos, pode-se seguir a sequência de procedimentos estabelecidos na NBR 10004 (ABNT, 2004), que são apresentados esquematicamente na Figura 10. O fluxograma e o conjunto de respostas conduzem a uma classificação adequada para o resíduo da nefelina sienito.

Figura 10 – Fluxograma representativo para a classificação ambiental do RNS.



Fonte: Adaptado da NBR 10004 (ABNT, 2004).

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos podem ser classificados como perigosos (classe I) ou não perigosos (classe II). Os perigosos são aqueles que apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente devido às suas propriedades físicas ou químicas e, por isso, não devem ser reaproveitados, sendo recomendada a sua disposição final de uma maneira adequada.

Os resíduos não perigosos, por sua vez, não apresentam os riscos descritos e tem potencialidade para o desenvolvimento de novas utilizações e sua consequente valorização. Eles são subdivididos em não inertes (A) ou inertes (B).

Os resíduos não inertes (classe II-A) podem apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água e, por causa disso, podem ter restrições para algumas aplicações ou demandar estratégias para adequação ao uso. Já os resíduos inertes (classe II-B), não apresentam constituintes solubilizados e lixiviados em concentrações superiores aos definidos para potabilidade da água. Em geral, resíduos provenientes da mineração de agregados, rochas e solos são classificados como inertes, mas podem sofrer contaminações devido ao processamento utilizado, como produtos químicos, discos de corte e abrasivos para polimento. A Tabela 6 apresenta a classificação ambiental para diferentes resíduos sólidos de mineração.

Tabela 6 – Classificação ambiental de diferentes resíduos sólidos de mineração.

<b>Fonte</b>	<b>Resíduo</b>	<b>Classificação</b>
Longhi <i>et al.</i> (2016)	caulim	IIA (não perigoso e não inerte)
Fontes <i>et al.</i> (2016)	minério de ferro	IIA (não perigoso e não inerte)
Acordi <i>et al.</i> (2023)	carvão	IIA (não perigoso e não inerte)
Agrizzi <i>et al.</i> (2022)	quartzito	IIB (não perigoso e inerte)
Almada <i>et al.</i> (2020)	rochas ornamentais	IIB (não perigoso e inerte)

Fonte: Autor (2024).

Desta maneira, analisando de forma detalhada as informações disponibilizadas nas tabelas da NBR 10004 (ABNT, 2004), bem como a origem, o processamento, as características e a composição do resíduo, é possível afirmar que o RNS tem origem conhecida, não consta nos anexos de materiais perigosos da referida norma e não possui características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Contudo, não foram conduzidas análises para a lixiviação e solubilização e o resíduo pode conter algum elemento em concentração superior ao permitido. Portanto, pode-se concluir que o RNS é um resíduo classe II (não perigoso) e, devido à similaridade com as classificações de outras rochas ígneas, possui provável classificação como inerte (B).

## 5.2 POTENCIALIDADES (P)

### 5.2.1 Análise física

Algumas das propriedades físicas dos agregados utilizados neste estudo, naturais (AMN e AGN) e artificial (ARNS), são apresentadas na Tabela 7, onde os valores entre parênteses indicam o desvio padrão dos resultados.

Tabela 7 – Caracterização física dos materiais AGN, AMN e ARNS.

Parâmetro	AGN	AMN	ARNS
DMC (mm)	19,00	2,36	1,18
Módulo de finura	6,82 (0,01)	2,72 (0,04)	2,23 (0,04)
Material fino (%)	2,01 (0,10)	2,74 (0,18)	2,75 (0,15)
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,89 (0,02)	2,52 (0,02)	2,49 (0,02)
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,49 (0,01)	1,52 (0,01)	1,34 (0,01)
Absorção de água (%)	1,54 (0,03)	0,62 (0,02)	0,70 (0,03)
Umidade crítica (%)	-	4,84 (0,10)	7,28 (0,06)
Coeficiente de inchamento	-	1,45 (0,01)	1,66 (0,01)

Fonte: Autor (2024).

Observa-se que existem diferenças nas propriedades investigadas entre os materiais utilizados como agregado miúdo, AMN e ARNS, especialmente em relação ao tamanho das partículas, massa unitária, umidade crítica e coeficiente de inchamento. Outras propriedades como o teor de material fino, massa específica e absorção de água apresentam valores similares entre os dois materiais.

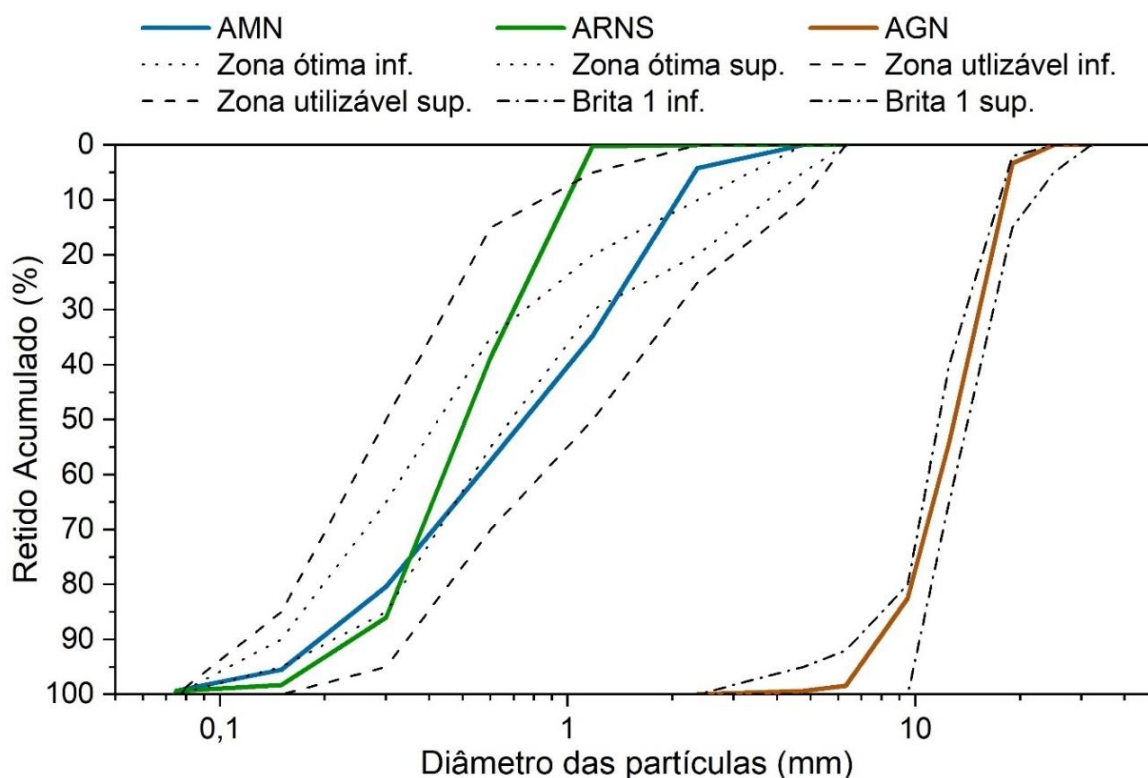
A DMC representa o tamanho da abertura da peneira, em milímetros, no qual o material apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou inferior a 5%. Os resultados obtidos foram de 2,36 mm para o AMN, 1,18 mm para o ARNS e 19,00 mm para o AGN. A DMC é muito utilizada para os agregados graúdos, de modo a verificar se o tamanho do agregado utilizado e o espaçamento entre as barras adotado em projeto, em um concreto armado, é adequado para evitar problemas no lançamento e adensamento durante a concretagem. Além disso, a DMC também pode indicar para os agregados miúdos, se houveram falhas de processamento e a existência de frações ou materiais inadequados para a utilização em argamassas.

O módulo de finura permite obter uma percepção de quão fino é o agregado, auxiliando em uma classificação de faixas de interesse (como areia fina, média ou grossa e brita 1, brita 2, dentre outras) ou mesmo fornecer uma breve concepção da curva de distribuição dos tamanhos de partículas dos materiais. Quanto menor for o módulo de finura, mais fino será o material.

Os resultados para os módulos de finura dos agregados foram de 2,72 e 2,23 para o AMN e ARNS, respectivamente, e de 6,82 para o AGN. Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2022), agregados miúdos que possuem módulo de finura entre 1,55 e 2,20 situam-se na zona utilizável inferior; entre 2,20 e 2,90 situam-se na zona ótima; e entre 2,90 e 3,50 situam-se na zona utilizável superior. Valores para o módulo de finura inferior a 1,55 sugerem agregados miúdos excessivamente finos e valores superiores a 3,50 sugerem agregados miúdos excessivamente grosseiros. Nos dois casos, os módulos de finura inadequados podem ocasionar patologias nos materiais cimentícios e em suas aplicações, não sendo recomendados para a construção civil.

As curvas de distribuição granulométrica dos agregados são apresentadas na Figura 11, juntamente com os limites superiores e inferiores, delimitando as regiões de utilização recomendadas na NBR 7211 (ABNT, 2022).

Figura 11 – Curvas granulométricas dos agregados AMN, ARNS e AGN.



Analisando as curvas de distribuição granulométrica dos agregados, observa-se que o AMN está situado inteiramente dentro dos limites de utilização normativo, em uma curva contínua e bem graduada. Já o ARNS possui uma fração de 10% fora dos limites normativos, apresentando uma curva uniforme. As diferenças nas inclinações das curvas entre os dois agregados miúdos indicam que o AMN possui partículas de diferentes tamanhos e em diferentes proporções, suavizando as mudanças de direção. Por outro lado, o ARNS apresenta teores percentuais mais elevados para faixas granulométricas mais estreitas (aproximadamente 85% do material fica retido em três peneiras). Desta forma, sugere-se uma classificação para o AMN como uma areia média-grossa e para o ARNS uma classificação como uma areia média-fina. O AGN, por sua vez, possui uma distribuição granulométrica uniforme, situando-se dentro dos limites normativos e podendo classificá-lo como brita 1.

O teor de material fino foi similar para os agregados miúdos, sendo o valor médio obtido de 2,74 e 2,75%, para o AMN e para o ARNS, respectivamente. O excesso de partículas finas nos agregados pode ser classificado como substância nociva e por isso, tem o seu limite fixado em 3% quando as matrizes cimentícias estão expostas ao desgaste superficial, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022).

Em geral, agregados miúdos naturais provenientes da sedimentação em leitos de rios apresentam baixo teor de material fino. O mesmo ocorre com agregados artificiais, obtidos pela britagem de rochas, seguido de processo de lavagem, onde grande parte desta fração fina é removida pela ação da água. De forma similar, o uso de aeroclassificadores no processo de beneficiamento da nefelina sienito podem ter contribuído para a redução do teor de material fino. Isso se deve ao fato de o sistema de exaustão ser capaz de empurrar as partículas mais finas e separar com eficiência partículas menores que 100  $\mu\text{m}$ , estando o resultado encontrado coerente.

A massa específica dos agregados é afetada pelo tipo de rocha, pela sua microestrutura e por sua composição mineralógica e, devido à grande quantidade utilizada nas dosagens, os agregados influenciam na massa específica dos produtos cimentícios (KUSUMAWARDANI; WONG, 2020; SANTOS, 2015; TOLSTOY *et al.*, 2020). Constatou-se resultados similares para os agregados miúdos, AMN e ARNS, onde os valores médios para a massa específica foram de 2,52 e 2,49  $\text{g/cm}^3$ , respectivamente, e de 2,89  $\text{g/cm}^3$  para o AGN. Desta forma, uma vez que as massas específicas dos agregados miúdos apresentarem resultados semelhantes, acredita-se que esta propriedade não influenciará na densidade das matrizes cimentícias.

Diferentemente dos valores semelhantes observados para a massa específica, os resultados indicaram uma redução para a massa unitária do resíduo. Os valores médios foram de 1,52 e 1,34 g/cm<sup>3</sup>, para os materiais AMN e ARNS, respectivamente, representando uma redução de, aproximadamente, 12%. Já o resultado obtido para o AGN foi de 1,49 g/cm<sup>3</sup>. A massa unitária dos materiais tem aplicação no transporte, armazenamento e dosagem dos insumos. Deste modo, a diferença observada entre os materiais não altera a sua utilização em matrizes cimentícias, mas requer atenção especialmente quando dosados em volume. Segundo Mehta e Monteiro (2014), os valores para agregados comumente utilizados variam de 1,30 a 1,75 g/cm<sup>3</sup>.

Os teores de absorção de água dos agregados foram de 0,62 e 0,70% para o AMN e para o ARNS, respectivamente, e de 1,54% para o AGN. Estes valores podem ser considerados baixos e são típicos de rochas ígneas, com estrutura maciça e compacta, que geralmente apresentam teores inferiores a 1,0% (ISAIA, 2017; MEHTA; MONTEIRO, 2014). A diferença observada entre o AMN e o ARNS, de 13%, pode contribuir para o aumento na demanda de água necessária para a fluidez das matrizes cimentícias com a utilização do resíduo.

O coeficiente de inchamento dos agregados miúdos é um valor decimal que representa a variação volumétrica causada quando a água livre na superfície das partículas promove tensão superficial, fazendo com que as partículas do agregado se separem e ocupem maior volume. Agregados mais finos, com maior porosidade e absorção de água, proporcionam incrementos nos valores para a umidade crítica e para o coeficiente de inchamento (NEVILLE, 2016; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em relação ao teor de umidade crítica, os valores foram de 4,84 e 7,28% para o AMN e para o ARNS, respectivamente, enquanto o coeficiente de inchamento foi de 1,45 para o AMN e 1,66 para o ARNS. O aumento dos valores observados para o ARNS é função da maior finura do resíduo, que demanda maior quantidade de água para molhar a superfície das partículas e intensifica o fenômeno. Os valores observados para o ARNS, embora superiores ao AMN, não impedem seu uso, mas exigem cautela durante os procedimentos de dosagem das matrizes cimentícias, caso não seja utilizado na condição seca.

Os resultados obtidos para todos os parâmetros físicos analisados neste estudo indicam que os materiais utilizados como agregados miúdos, AMN e ARNS, e também como agregado graúdo, AGN, são adequados para uso em matrizes cimentícias.

### 5.2.2 Análise química e mineralógica

Os resultados da análise química por meio da técnica de FRX, para os materiais utilizados como agregados (AMN, AGN e ARNS) e também para a nefelina sienito (NS), são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – FRX dos materiais AMN, AGN, NS e ARNS.

<b>Elementos</b>	<b>AMN</b>	<b>AGN</b>	<b>NS</b>	<b>ARNS</b>
SiO <sub>2</sub> (%)	92,32	54,84	70,40	56,16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,20	15,07	16,44	20,46
K <sub>2</sub> O (%)	2,29	1,27	7,77	4,68
Na <sub>2</sub> O (%)	0,30	2,30	3,12	10,35
CaO (%)	0,05	10,02	1,01	1,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,26	9,82	0,58	5,48
TiO <sub>2</sub> (%)	0,15	1,11	0,09	0,46
MgO (%)	-	5,27	<0,05	0,07
MnO (%)	-	0,15	<0,05	0,53
P. F. (%)	0,43	-	0,55	0,63
Outros (%)	-	0,15	0,04	0,03

Fonte: Autor (2024).

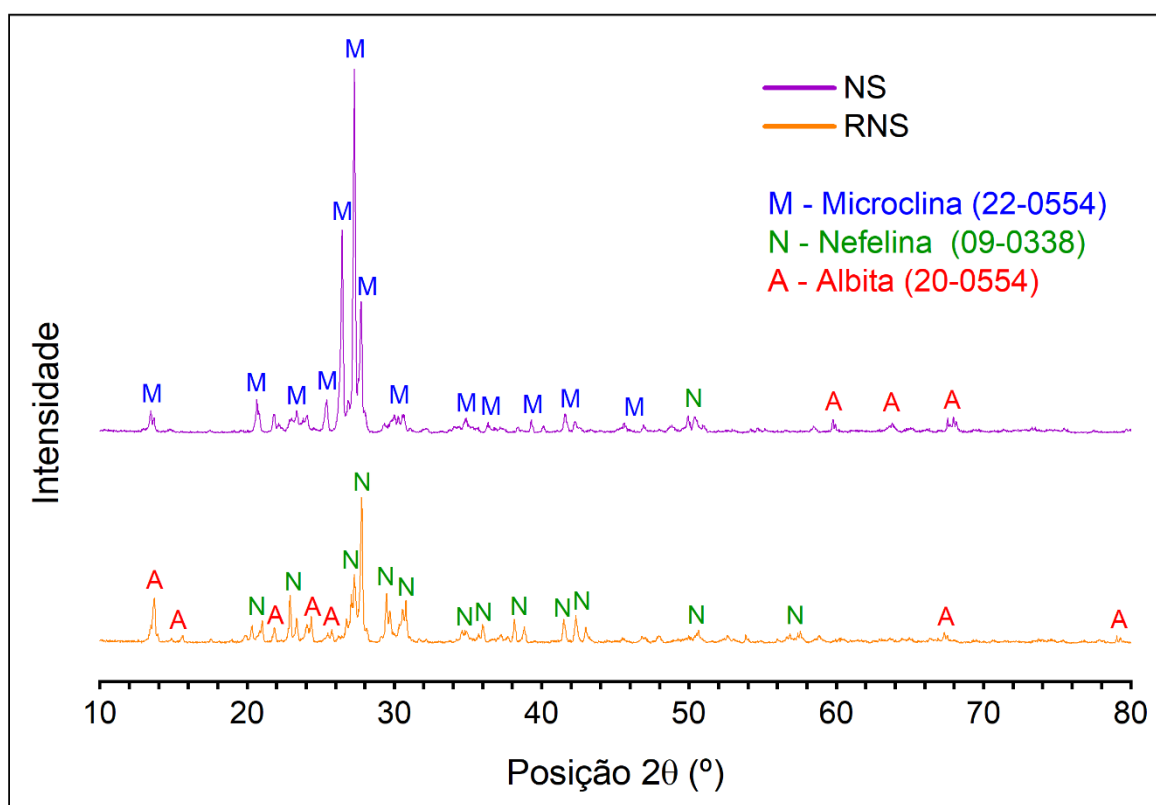
Verifica-se que para todos os materiais há predominância de dois óxidos, sendo eles a sílica (SiO<sub>2</sub>) e a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), que somados apresentam concentração mínima de, aproximadamente, 70% para o AGN e concentração máxima de, aproximadamente, 96% para o AMN. Segundo Jiang *et al.* (2023), resíduos com altas concentrações de sílica e alumina são frequentemente utilizados como matéria-prima para o desenvolvimento de agregados de alto desempenho.

Além da sílica e da alumina, destacam-se para os materiais NS e RNS, as concentrações de álcalis totais (óxido de sódio + óxido de potássio), superiores a 10%. Desta forma, diferente de outros resíduos sólidos, o RNS possui elevado teor de álcalis totais e pode ser aplicado no setor siderúrgico, auxiliando na redução da temperatura de sinterização (BURAT; CANGAL; ONAL, 2006; ESPOSITO *et al.*, 2005), desde que a alvura não seja um fator determinante do processo.

Na Figura 12 são apresentados os difratogramas dos materiais NS e RNS, indicando o tipo de estrutura química e composição mineralógica. Observa-se que os

materiais apresentam estrutura cristalina e que a NS possui silicatos félsicos, compostos por feldspatos alcalinos contendo potássio (microclina) e sódio (albita), além da nefelina que tipicamente contém sódio e/ou potássio. Já o RNS possui como principais minerais a albita e a nefelina. Estes materiais possuem ainda minerais máficos, que podem ser observados visualmente a olho nu, e devido à presença de óxido de ferro, identificada na análise por FRX, possivelmente são piroxênios.

Figura 12 – DRX do mineral NS e do RNS.



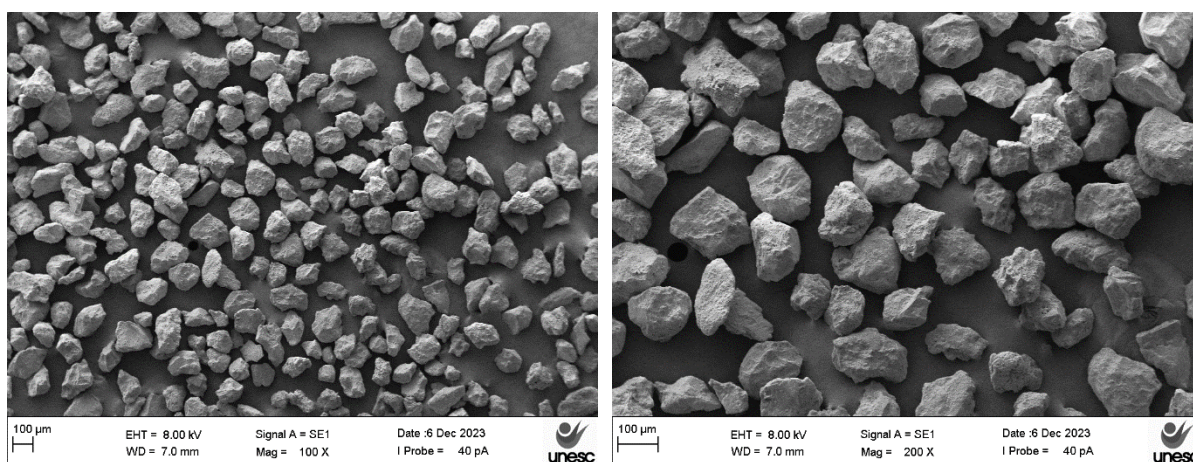
Fonte: Autor (2024).

Tipicamente, pode-se representar a microclina como  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ , a abita como  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  e a nefelina como  $(\text{Na,K})\text{AlSiO}_4$ , o que correlaciona a NS com maiores teores de potássio e o RNS com maiores teores de sódio em suas composições. Esses minerais são portadores de sílica, alumina e álcalis, o que justifica as concentrações observadas pela técnica de FRX, apresentadas na Tabela 8, e também estão de acordo com as principais fases mineralógicas identificadas na literatura para a nefelina sienito, apresentadas no Quadro 2.

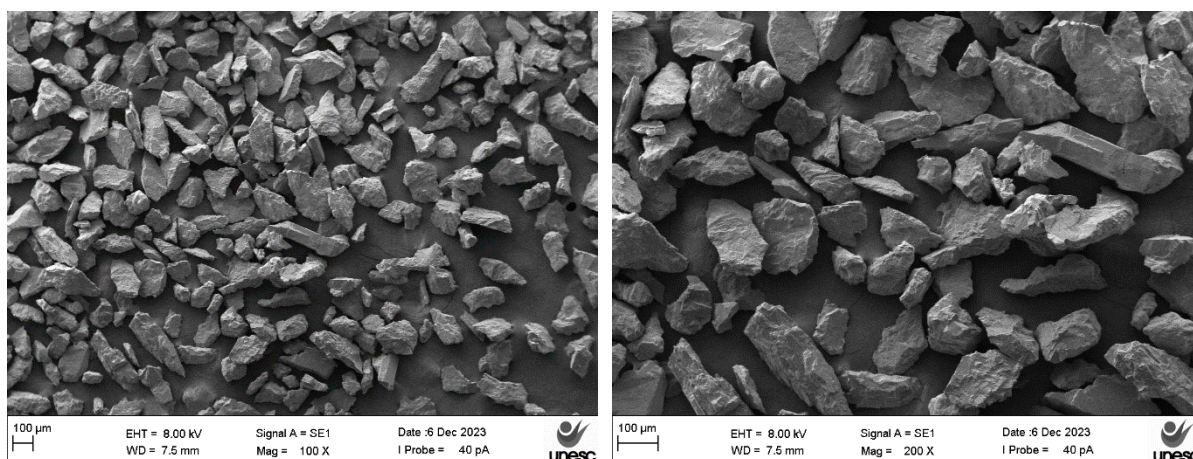
### 5.2.3 Análise morfológica

A Figura 13 apresenta imagens do AMN e do ARNS, revelando as características morfológicas dos materiais. Percebe-se a predominância de partículas arredondadas e cúbicas no AMN, tipicamente resultantes do processo erosivo das rochas, do transporte e acúmulo nas regiões de planícies. Já o ARNS apresenta partículas irregulares com predominância de formas alongadas, achatadas e angulares. Estas formas são típicas de agregados artificiais obtidas pelo processo de britagem para a cominuição das rochas.

Figura 13 – Morfologia por MEV das partículas do AMN e do ARNS.



a) Morfologia das partículas do AMN nas magnitudes de 100x e 200x.



b) Morfologia das partículas do ARNS nas magnitudes de 100x e 200x.

Fonte: Autor (2024).

A forma e a textura das partículas do agregado miúdo podem contribuir fortemente na mobilidade das argamassas e concretos, alterando a viscosidade plástica. As partículas arredondadas e lisas contribuem para a maior fluidez,

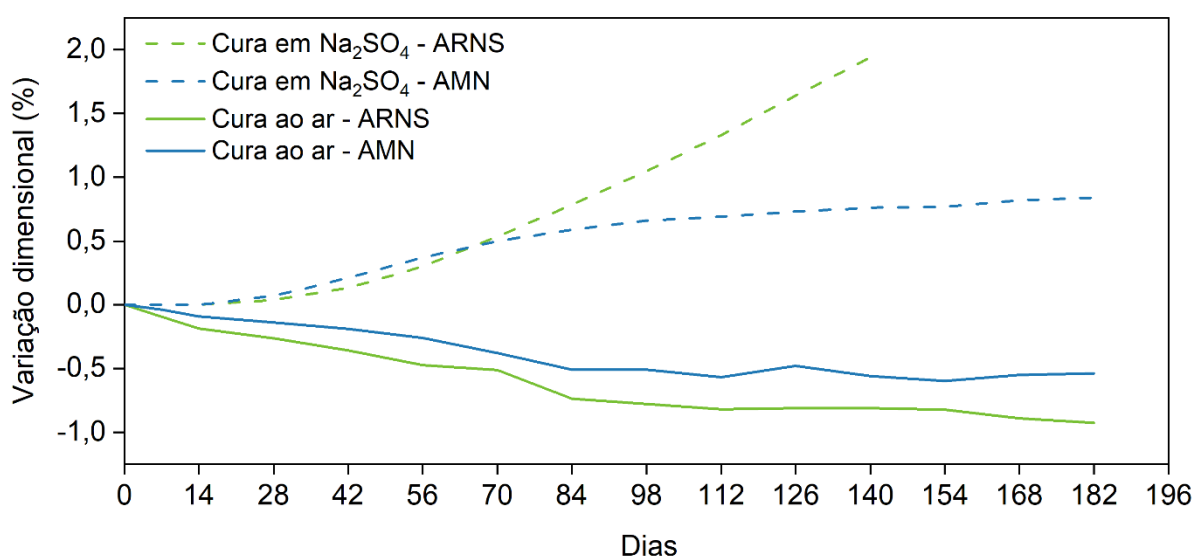
diminuindo a necessidade de água e pasta para mobilidade do sistema cimentício. Já as partículas irregulares e rugosas, além de aumentarem o atrito e reduzirem a fluidez, são mais propensas para formarem regiões com acúmulo de água, resultando em uma zona de transição interfacial mais fraca, reduzindo o desempenho, prejudicando a trabalhabilidade e necessitando de maior consumo de pasta (NEVILLE, 2016; MEHTA; MONTEIRO, 2014; WESTERHOLM *et al.*, 2008).

#### 5.2.4 Análise de durabilidade

Resíduos de mineração podem causar reações adversas quando utilizados como agregados devido à variação dimensional das matrizes cimentícias. Assim, ao utilizá-los é fundamental realizar análise de durabilidade, por meio de métodos acelerados em ambientes agressivos ou que avaliam o comportamento de longa duração em ambientes de uso, ambos investigados nesta pesquisa.

As variações dimensionais das argamassas, utilizando o AMN e o ARNS, submetidas aos diferentes ambientes de cura, são apresentadas na Figura 14. Observa-se um comportamento similar para as argamassas, independente do agregado miúdo utilizado, apresentando retração quando submetidas a cura ao ar e expansão quando submetidas a cura em solução agressiva de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Figura 14 – Variações dimensionais das argamassas em cura ao ar e em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .



Fonte: Autor (2024).

A retração por secagem ocorre em função da alteração do volume da matriz cimentícia causada pela perda de água interna adsorvida por evaporação (NEVILLE, 2016; MAO; LIU; SHI, 2021; ZHANG; ZAKARIA; HAMA, 2013). Já no ataque por

sulfatos, os íons  $\text{SO}_4^{2-}$  penetram na pasta e reagem com os cristais de monossulfatos (que podem estar incorporados no C-S-H), ocasionando a formação de uma etringita tardia, e também com a portlandita, formando sulfatos de cálcio (GHAFOORI; BATILOV; NAJIMI, 2020). A etringita e o gesso, devido ao confinamento e maior volume que as fases anteriores, tensionam a matriz gerando uma expansão significativa, que ocasiona fissurações na matriz (GHAFOORI; BATILOV; NAJIMI, 2020; YU; SUN; SCRIVENER, 2013).

Após seis meses de cura ao ar, a argamassa utilizando o AMN apresentou retração máxima da matriz de 0,6%, enquanto a argamassa desenvolvida com o ARNS apresentou uma retração máxima de 1,0%. As deformações ocasionadas pela variação volumétrica por secagem estão relacionadas com as características dos agregados, como área de superfície específica, taxa de absorção de água, massa específica e módulo de elasticidade (MAO; LIU; SHI, 2021; ZHANG; ZAKARIA; HAMA, 2013). Os agregados exercem a influência mais importante, pois restringem a quantidade de retração da pasta de cimento; no entanto, outros fatores além das características dos agregados devem ser considerados como a relação a/c, quantidade de agregados utilizados na dosagem e as condições de cura (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

Assim, a diferença observada para a retração das argamassas na cura ao ar pode estar relacionada com a maior finura do ARNS em relação ao AMN, visto que as propriedades de absorção de água e massa específica são semelhantes entre os agregados miúdos. Todavia, as variações dimensionais das argamassas, com ambos os agregados, não promoveram nenhuma patologia visível nos corpos de prova. Pode-se considerar, ainda, que ocorre a estabilidade das matrizes cimentícias após 90 dias de cura ao ar, o que é consistente com os resultados obtidos por He *et al.* (2021), que identificou uma estabilidade para a matriz aos 80 dias.

Quando as argamassas foram submetidas em uma cura mais severa, com sulfato de sódio, os resultados mostraram um aumento da expansibilidade com o tempo de exposição. Aos 56 dias, período de cura estabelecido em norma, a matriz contendo o AMN apresentou uma expansibilidade de 0,37% e a matriz desenvolvida com o ARNS uma expansibilidade de 0,30%.

Estes resultados demonstram que as argamassas desenvolvidas utilizando o ARNS, aos 56 dias de cura, apresentam uma retração superior, quando curadas ao ar, e uma expansão inferior, quando curadas em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , em comparação com as

argamassas que utilizam o AMN. Nenhuma patologia foi identificada nas argamassas desenvolvidas com o ARNS em ambos os procedimentos de cura. Até esta idade não foram observadas manifestações patológicas em nenhum dos corpos de prova e esses resultados preliminares indicam que o uso do resíduo como agregado é possível para o uso do ARNS em argamassas e concretos.

De forma a investigar possíveis manifestações patológicas devido à exposição prolongada (acima de 60 dias) em solução de sulfato de sódio, esse teste foi conduzido durante 182 dias. A Figura 15 apresenta o aspecto final das argamassas após o tempo de cura em solução agressiva. Nota-se que as argamassas que utilizaram o AMN permanecem estruturalmente estáveis e sem patologias visíveis. Já as argamassas que utilizaram o ARNS estão colapsadas, com patologias que evidenciam uma alta concentração de trincas e a falta de planicidade.

Figura 15 – Aspecto das argamassas após 182 dias de cura em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .



a) Argamassas desenvolvidas com o AMN.



b) Argamassas desenvolvidas com o ARNS.

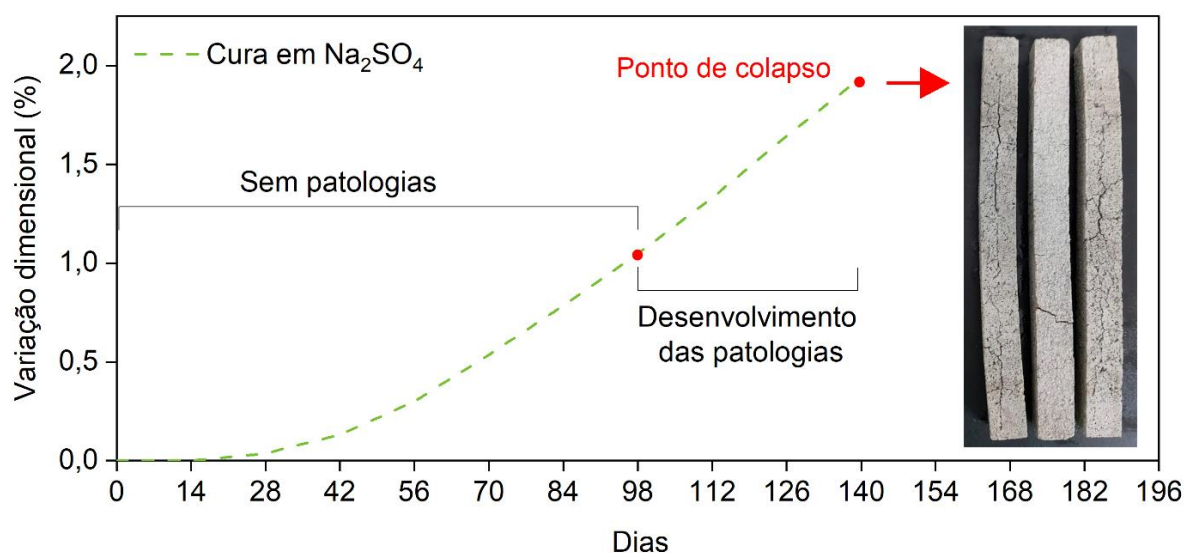
As argamassas desenvolvidas com o AMN concluíram o ciclo de cura apresentando uma expansão máxima de, aproximadamente, 0,9%. Entretanto, as argamassas desenvolvidas com o ARNS sofreram colapso antes do final da cura, com uma expansibilidade máxima de, aproximadamente, 2,0%.

Segundo Ghafoori, Batilov e Najimi (2020), argamassas que possuam menor porosidade e matriz mais compacta, são fisicamente mais impermeáveis e resistentes ao transporte de íons. De acordo com Yu, Su e Scrivener (2013), inicialmente o sulfato reage com o aluminato em poros grandes, onde a etringita formada não ocasiona expansão. Somente após todo o consumo de aluminato livre, ocorre a formação de uma etringita em pequenos poros dentro do C-S-H, que levam à expansão da pasta.

Estas observações estão de acordo com os resultados encontrados onde, até os 60 dias de cura em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , as argamassas apresentaram expansibilidades similares. Além disso, o maior teor de alumina no ARNS e a possível presença de uma maior porosidade na argamassa desenvolvida com o resíduo, podem ter intensificado a formação de etringita tardia nos pequenos poros, tensionando ainda mais a matriz e favorecendo a continuidade das patologias.

A Figura 16 apresenta mais detalhes sobre a variação dimensional das argamassas desenvolvidas com o ARNS em cura com  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . A exposição prolongada provocou o surgimento de patologias a partir de 98 dias de cura. Primeiramente ocorreram fissuras mapeadas nos corpos de prova, seguidas do início da flexão das barras, fissuras longitudinais e transversais, com aumento progressivo até o colapso que ocorreu em 140 dias.

Figura 16 – Detalhes da expansibilidade da argamassa com o ARNS em  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .



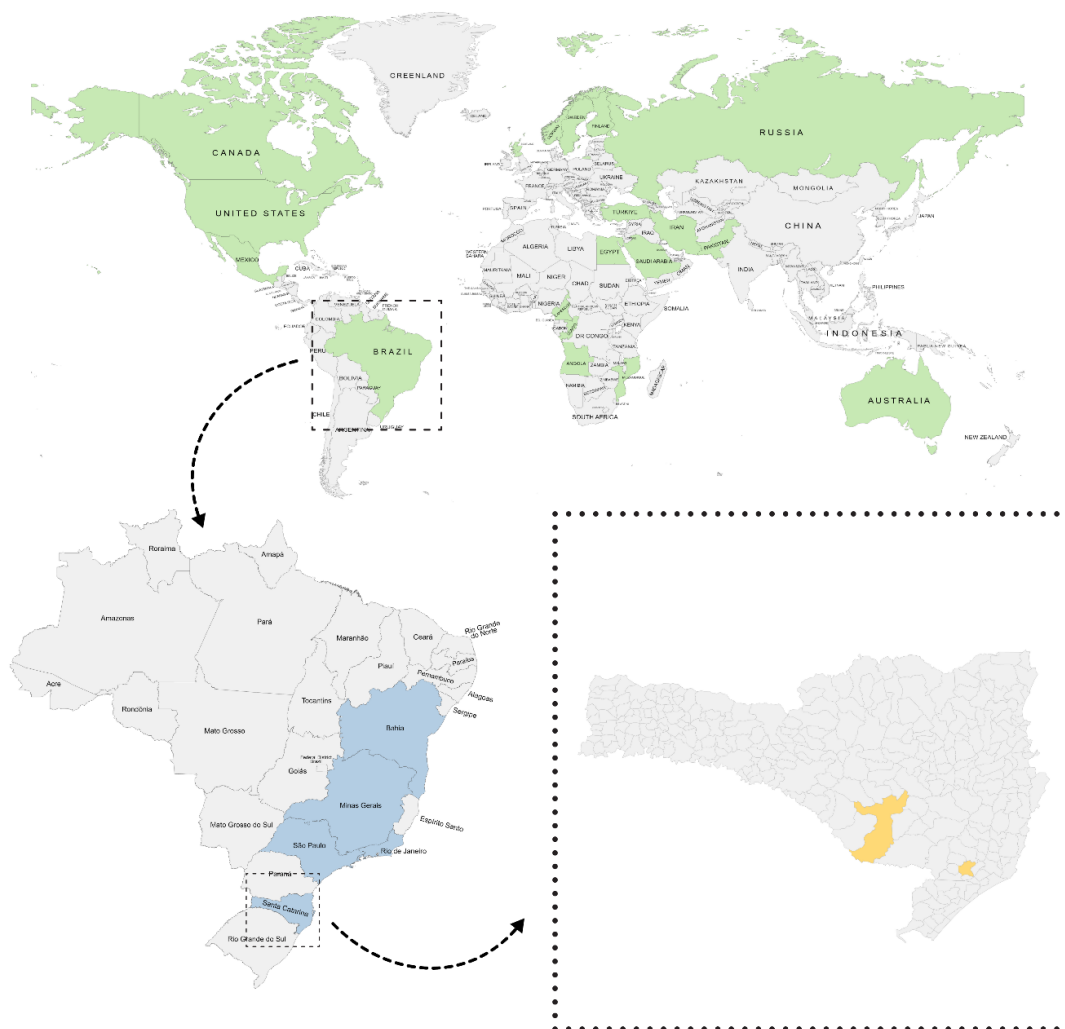
Fonte: Autor (2024).

Embora a argamassa desenvolvida com o ARNS não tenha apresentado patologias durante o período de ensaio normativo (56 dias), quando houver exposição prolongada em ambientes agressivos, soluções devem ser desenvolvidas para mitigar os efeitos deletérios observados. Algumas das possibilidades estão relacionadas à redução da porosidade e à densificação da matriz (GHAFOORI; BATILOV; NAJIMI, 2020) e do uso de materiais cimentícios suplementares (PARIS *et al.*, 2016). Assim, recomenda-se uma investigação científica mais aprofundada antes da sua utilização em matrizes cimentícias na construção civil.

### 5.3 QUANTIDADE E VIABILIDADE (Qv)

A nefelina sienito pode ser encontrada em todos os continentes e a localização dos principais depósitos são apresentados na Figura 17.

Figura 17 – Localização das principais jazidas da nefelina sienito: no mundo (verde), no Brasil (azul) e no estado de Santa Catarina (amarelo).



Fonte: Autor (2024).

Em termos volumétricos, as maiores reservas pertencem à Rússia, beneficiadas para produção de alumina e subprodutos, seguido do Canadá e Noruega, que possuem as maiores reservas comercializadas para uso em cerâmicas e vidros (MCLEMORE, 2009). Em relação aos tamanhos dos depósitos brasileiros, foi estimada em 2018 uma reserva mineral da nefelina sienito de aproximadamente 523 milhões de toneladas no estado de Santa Catarina, líder em atividade exploratória no Brasil. Depósitos menores de nefelina sienito também foram identificados nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais e Bahia (ANM, 2019).

No estado de Santa Catarina, apenas duas empresas beneficiam atualmente a nefelina sienito, sendo utilizada como principal substituto do feldspato no mercado cerâmico da região, um dos mais fortes do país. Em 2018, o percentual de resíduos sólidos gerados durante o processo de beneficiamento da nefelina sienito foram de aproximadamente 23%, calculado pela diferença entre a quantidade bruta extraída e a quantidade comercializada (ANM, 2019). Este valor é semelhante ao observado por Volkmann (2004), que relatou que as empresas descartam um quarto da rocha bruta da nefelina sienito e as estocam na forma de pilhas de resíduos. Como resultado da atividade exploratória, se beneficiada toda a jazida do estado de Santa Catarina, será gerado mais 130 milhões de toneladas de resíduos da nefelina sienito, os quais podem ser valorizados como insumos minerais para diferentes setores industriais.

Apesar das informações apresentadas já revelarem dados interessantes, há necessidade de dados mais atualizados dos órgãos gestores sobre as quantidades de reservas, frações processadas e geração de resíduos sólidos relacionados ao processamento de nefelina sienito, tanto nacionalmente quanto mundialmente. Contudo, as informações disponíveis indicam fortemente a sua viabilidade e justificam a necessidade de desenvolver alternativas para aplicações do RNS.

Em relação à demanda de insumos pelo setor da construção civil, segundo a ANEPAC (2023), no ano de 2022 a demanda por agregados no Brasil foi de, aproximadamente, 640 milhões de toneladas, sendo os agregados miúdos correspondentes a quase 60% desse valor (374 milhões de toneladas). Sobre o uso dos agregados pelo setor, estima-se um consumo de 1,4 t/m<sup>2</sup> de uma edificação (desde casas populares de 50 m<sup>2</sup> até escolas de 1.200 m<sup>2</sup>), 3 mil t/km de estrada construída e 100 t/km para a manutenção em estradas. O maior consumo de agregados miúdos está associado ao desenvolvimento de materiais cimentícios como argamassas (35%), concretos (20%) e pré-moldados (10%) (ANEPAC, 2012).

Os concretos, para dosagens convencionais, são compostos em volume por 10% de cimento, 40% de agregado miúdo, 42% de agregado graúdo, 7% de água e 1% de aditivos/adições. Assim, para cada m<sup>3</sup> de concreto produzido seriam necessários, aproximadamente, 300 kg de cimento e 1.000 kg de agregado miúdo. Além disso, existe uma tendência de redução no consumo de clínquer, com um progressivo aumento do uso de materiais cimentícios suplementares no cimento Portland, podendo chegar ao teor de 48% em 2050 (SNIC, 2019). Em 2022, a produção mundial de cimento foi de aproximadamente 4,13 bilhões de toneladas e no Brasil de, aproximadamente, 0,64 bilhões de toneladas (SGB, 2023).

Os principais minerais que possuem o ferro em sua composição são a hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), a magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) e a goethita (FeO(OH)), onde quase integralmente o minério de ferro é utilizado para produção de aços e ferros fundidos. No entanto, o ferro também pode ser obtido como subproduto de processos industriais (em minerações, metalurgias e siderurgias) com a recuperação da fração de interesse ocorrendo, principalmente, por separação magnética. Embora o minério de ferro seja largamente extraído e possua o maior faturamento por substância, atingindo o valor de 250 bilhões de reais em 2021 (IBRAM, 2021a), com a produção bruta de minério de ferro no mesmo ano de, aproximadamente, 570 milhões de toneladas (ANM, 2023), a recuperação deste mineral em resíduos sólidos contribui para a redução dos impactos ambientais associados à extração e ao descarte dos rejeitos em barragens.

O potássio é amplamente utilizado como fertilizante natural e remineralizador de solo por ser um dos macronutrientes essenciais para o crescimento das plantas. De acordo com Orris *et al.* (2014), os minerais primários fonte de óxido de potássio e suas respectivas concentrações, são a silvita (63%), a silvinita (39%) a langbeinita (23%), a kainita (19%), a carnalita (17%) e a polihalita (16%). No entanto, as principais reservas estão concentradas no hemisfério norte e outros minerais, com menores teores (sienito ultrapotássico, arenito glauconíticos e nefelina sienito), tem sido estudados como alternativas (HASELI *et al.*, 2019; SAMANTRAY *et al.*, 2022).

O cloreto de potássio (KCl) tem sido a forma mais comum para a comercialização do K<sub>2</sub>O (90%), sendo o sulfato de potássio (5%) e o sulfato duplo de potássio e magnésio (5%) as outras formas. O Brasil tem consumido anualmente cerca de 4,6 milhões de toneladas de potássio, na forma de KCl, sendo o segundo maior consumidor mundial. A produção nacional atendeu menos de 20% da sua demanda em 2020, sendo necessários elevados investimentos em importações

(IBRAM, 2021b). Em 2021 foram gastos, aproximadamente, 4,3 bilhões de dólares na importação de cerca de 13,2 milhões de toneladas de potássio (IBRAM, 2021a).

Desta forma, tem-se por um lado a geração de resíduos sólidos provenientes do beneficiamento da nefelina sienito e, por outro, a elevada demanda de diferentes setores por insumos minerais. Assim, verificou-se neste estudo as possibilidades de aplicabilidade do RNS como agregado miúdo e como material cimentício suplementar em matrizes cimentícias (argamassas e concretos), bem como a possibilidade de segregação da fração ferrosa e potássica, valorizando o RNS para diferentes setores.

## 5.4 APLICABILIDADE (A)

### 5.4.1 Análise do RNS como agregado miúdo em argamassas

A relação a/c necessária para que a argamassa de referência (A0) apresentasse uma consistência de, aproximadamente, 260 mm foi obtida experimentalmente. Essa relação a/c foi mantida constante para as argamassas A50 e A100, de modo a investigar as variações nas propriedades de interesse que a utilização do ARNS, em substituição ao AMN, ocasionaria nas argamassas.

A utilização do resíduo como agregado miúdo promoveu reduções nas consistências das argamassas e com o intuito de manter a consistência de  $260 \pm 5$  mm para as argamassas que utilizavam o ARNS, aumentou-se a relação a/c nas dosagens A50+ e A100+. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para as relações a/c e para as médias das consistências das argamassas desenvolvidas.

Tabela 9 – Relações a/c e consistências das argamassas desenvolvidas.

<b>Sigla</b>	<b>A0</b>	<b>A50</b>	<b>A100</b>	<b>A50+</b>	<b>A100+</b>
Relação a/c	0,70	0,70	0,70	0,80	0,93
Consistência (mm)	260	179	-	258	260

Fonte: Autor (2024).

Observa-se que a substituição do AMN por ARNS nas dosagens A50 e A100 ocasionam em uma redução da consistência das argamassas, alterando de 260 mm para 179 mm, na argamassa A50. Já para a argamassa A100 a redução foi ainda maior, no entanto, não foi possível realizar a medição pois não houve espalhamento adequado da argamassa, devido à falta de coesão.

Conforme observado nas análises físicas, o AMN e o ARNS apresentaram resultados similares para o teor de material fino, massa específica e absorção de água. Entretanto, a análise morfológica indicou uma predominância de partículas arredondadas e lisas no AMN e de partículas irregulares com predominância de formas alongadas, achatadas e angulares no ARNS.

A mudança na morfologia da partícula do agregado miúdo de formato cúbico para formato alongado pode ocasionar um aumento de quase três vezes na viscosidade plástica das argamassas (WESTERHOLM *et al.*, 2008). Logo, a diminuição da fluidez, devido à substituição do AMN por ARNS, pode ser decorrência da forma e textura das partículas, onde a utilização do ARNS altera a tensão de escoamento, contribuindo para o aumento da viscosidade plástica e do atrito entre as partículas, reduzindo os valores da consistência das argamassas.

De fato, a forma e textura das partículas contribuem para a mobilidade do sistema, reduzindo-a quando as partículas não são arredondadas e lisas. Entretanto, os efeitos negativos podem ser eliminados, ou significativamente reduzidos, com o aumento do volume de pasta (HAACH; VASCONCELOS; LOURENÇO, 2011; NEVILLE, 2016; WESTERHOLM *et al.*, 2008).

A redução do módulo de finura observado no ARNS intensificou a demanda de água para manutenção da fluidez do sistema. Isso ocorre uma vez que a redução no tamanho das partículas acarreta em um aumento da área de superfície, demandando maior quantidade de água para molhar as partículas (NEVILLE, 2016; WESTERHOLM *et al.*, 2008). Esse resultado foi similar ao observado por Haach, Vasconcelos e Lourenço (2011), que também estudaram argamassas com a dosagem 1:3, utilizando dois diferentes agregados miúdos, onde a argamassa com agregado miúdo mais fino demandou maior quantidade de água para obter a mesma consistência.

Para manutenção da consistência das argamassas A50+ e A100+ em  $260 \pm 5$  mm, foi necessário modificar as relações a/c das argamassas de 0,70 para 0,80 e para 0,93, respectivamente. Deste modo, as argamassas necessitaram de um aumento na quantidade de água da dosagem de, aproximadamente, 14% para A50+ e de, aproximadamente, 33% para A100+, ambas em relação a argamassa A0.

A Figura 18 apresenta os corpos de prova das argamassas desenvolvidas onde, em termos visuais, as diferentes dosagens possuem superfícies semelhantes, destacando-se apenas a alta rugosidade para a argamassa A100.

Figura 18 – Imagens dos corpos de prova das argamassas aos 28 dias.



Fonte: Autor (2024).

As análises estatísticas realizadas para as propriedades das argamassas são apresentadas na Tabela 10, referentes aos resultados obtidos por ANOVA e também para o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados.

Tabela 10 – Análises estatísticas dos resultados obtidos para as argamassas.

Propriedades	ANOVA	Gráfico de Pareto		
	R <sup>2</sup>	% ARNS	Relação a/c	Combinação
Teor de ar	0,9984	+27,36	-31,78	-25,98
Densidade Fresco	0,9980	-34,63	+17,68	+20,91
Densidade Endurecido	0,9705	-24,87	-	+6,18
Compressão	0,8805	-9,91	-6,35	+2,99
Tração na Flexão	0,6359	-4,57	-3,00	-

Fonte: Autor (2024).

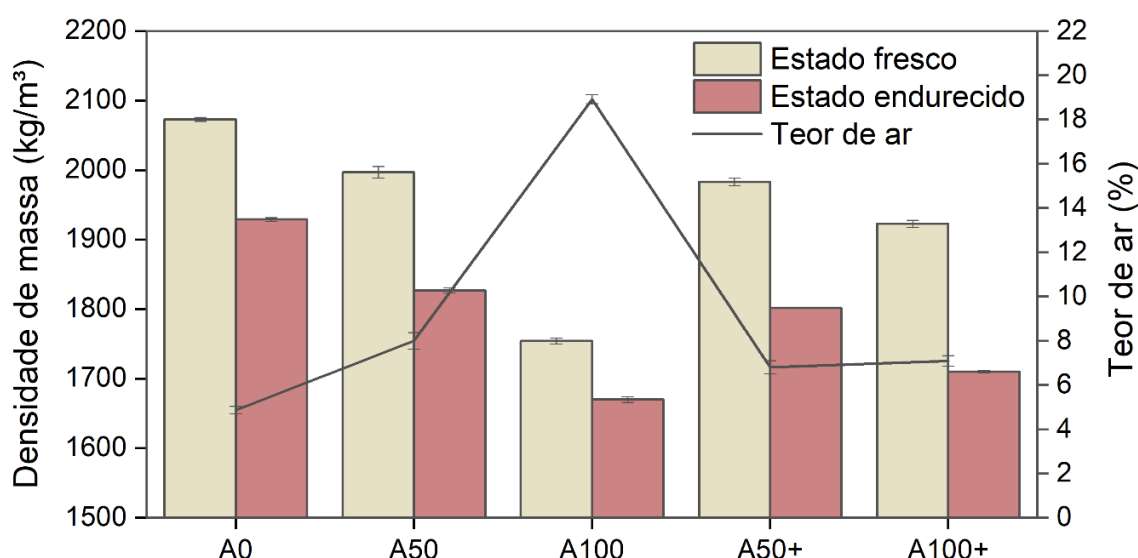
Constata-se que apenas a propriedade mecânica de tração na flexão não pode ser explicada pelo modelo ( $R^2 = 0,6359$ ). No entanto, considera-se que a resistência à compressão é bem representada pelo modelo ( $R^2 = 0,8805$ ) e as demais propriedades são fortemente representadas pelos modelos ( $R^2 > 0,9700$ ).

Os sinais, positivo e negativo, do gráfico de Pareto indicam se os fatores, ou a combinação dos fatores aumentam ou reduzem as propriedades investigadas. A

magnitude dos valores pode contribuir para as análises onde, quanto maior for o valor, maior será sua influência. Assim, com base nos resultados e análises, observa-se que os teores de ARNS e as relações a/c afetam as propriedades das argamassas investigadas neste estudo, tanto os dois fatores de maneira individuais, bem como a sua combinação, especialmente no estado fresco para a densidade e teor de ar.

As densidades de massa, como também os teores de ar das argamassas são apresentados na Figura 19. Observa-se que o aumento da utilização do ARNS resulta em um aumento no teor de ar, ocasionando uma redução nas densidades das argamassas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Figura 19 – Densidades de massa e teor de ar das argamassas desenvolvidas.



Fonte: Autor (2024).

Em relação à densidade de massa no estado fresco, a argamassa mais densa foi A0, com um valor médio de 2073 kg/m<sup>3</sup> e a menos densa foi A100, com um valor médio de 1754 kg/m<sup>3</sup>, representando uma redução de, aproximadamente, 15%. Os valores médios para as outras dosagens foram de 1997 kg/m<sup>3</sup> para A50, 1983 kg/m<sup>3</sup> para A50+ e 1923 kg/m<sup>3</sup> para A100+, representando reduções de, aproximadamente, 4, 4 e 7%, respectivamente, em relação a A0.

Analisando a densidade de massa no estado endurecido, a argamassa mais densa foi A0, com um valor médio de 1929 kg/m<sup>3</sup> e a argamassa menos densa foi A100, com um valor médio de 1670 kg/m<sup>3</sup>, representando uma redução de, aproximadamente, 13%. Os valores médios para as outras dosagens foram de 1827 kg/m<sup>3</sup> para A50, 1802 kg/m<sup>3</sup> para A50+ e 1710 kg/m<sup>3</sup> para A100+, representando reduções de, aproximadamente, 5, 7 e 11%, respectivamente, em relação a A0.

Verifica-se uma redução da densidade das argamassas no estado endurecido, em relação ao estado fresco. Essa redução é ocasionada pela secagem por evaporação da água excedente livre, necessária para se obter uma consistência adequada para as argamassas, e também pela sua reação com o cimento Portland, para formação de novas fases minerais hidratadas (MACHI *et al.*, 2021).

O valor médio para o teor de ar das argamassas A0, A50 e A100 foram de, aproximadamente, 5%, 8% e 19%, respectivamente. O aumento da relação a/c promoveu uma redução do teor de ar das argamassas, onde o valor médio foi de 7% para as dosagens A50+ e A100+.

As maiores variações entre os resultados foram observadas para as argamassas que utilizaram integralmente o ARNS (A100 e A100+) e podem ser explicadas com o auxílio da Figura 18. Logo, a falta de água na dosagem A100 conduziu a uma argamassa de aspecto seco e pouco fluida, dificultando a moldagem dos corpos de prova, ocasionando um aumento da porosidade e redução das densidades. Esses efeitos foram parcialmente corrigidos na dosagem A100+, em função do maior teor de água, que conduziu a uma maior mobilidade do sistema cimentício no estado fresco e preencheu parcialmente os vazios da matriz.

O aumento da relação a/c das dosagens A50 e A100 para as dosagens A50+ e A100+, praticamente não promoveu alterações nas densidades ou no teor de ar das argamassas, sendo menores que 3%. Com exceção da densidade no estado fresco das argamassas A100 e A100+, cuja alteração foi de, aproximadamente, 10%. Esses resultados indicam que o uso integral do resíduo como agregado exerce maior influência nas propriedades das argamassas, devido à maior demanda de água para manter a trabalhabilidade das argamassas.

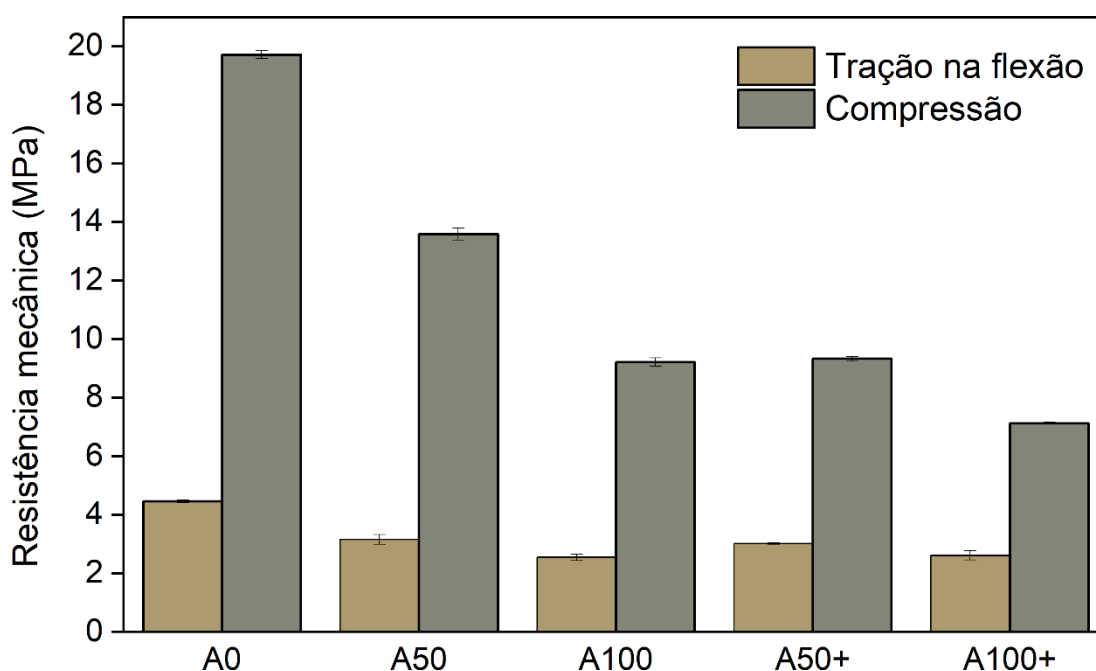
As propriedades dos agregados, como a finura e a distribuição do tamanho das partículas, a massa específica, a massa unitária e a dosagem dos insumos, exercem forte influência nas densidades das argamassas e podem ter contribuído para as diferenças observadas entre as dosagens (CARASEK, 2017; HAACH; VASCONCELOS; LOURENÇO, 2011; SANTOS, 2015).

Considerando que os agregados miúdos, AMN e ARNS, apresentam massas específicas semelhantes, baixa porosidade e baixa absorção de água, a diferença nas densidades das argamassas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, se deve, principalmente, ao aumento do teor de ar ocasionado pela utilização do ARNS, que é consequência da redução da fluidez e da mobilidade do sistema. Sendo assim,

quanto maior a substituição do AMN por ARNS, maior será a incorporação de ar no sistema e conseqüentemente, menores serão as densidades.

A Figura 20 apresenta os resultados obtidos para as resistências mecânicas à tração na flexão e à compressão das argamassas estudadas. Nota-se que a utilização do ARNS em substituição ao AMN ocasiona uma redução da resistência mecânica, tanto à tração na flexão quanto à compressão, e que o aumento da relação a/c para as argamassas pode intensificar essa redução.

Figura 20 – Resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas.



Fonte: Autor (2024).

Analisando a resistência à tração na flexão das argamassas, observa-se uma redução de, aproximadamente, 29% para A50, 43% para A100, 32% para A50+ e 41% para A100+, em relação a argamassa A0. A análise de variância indicou que não há diferenças significativas para as médias observadas entre A50 e A50+ e entre A100 e A100+. Deste modo, os resultados demonstram que o aumento na relação a/c para as argamassas que utilizam o ARNS melhora a trabalhabilidade e facilita a moldagem sem ocasionar significativa redução no desempenho à tração na flexão.

Em relação à resistência à compressão das argamassas, as reduções foram de, aproximadamente, 31% para A50, 53% para as argamassas A100 e A50+ e de 64% para A100+, em relação ao A0. Para a compressão, o aumento na relação a/c intensificou a queda de desempenho mecânico das argamassas com ARNS.

Reduções no desempenho mecânico das argamassas já eram esperadas devido aos resultados anteriores revelarem que as argamassas desenvolvidas com o ARNS apresentam menores densidades e maiores teores de ar. De fato, diversos fatores podem contribuir para a redução da resistência das argamassas, como a relação a/c, as propriedades dos agregados, a densidade da matriz e a porosidade.

Quando a relação a/c de uma dosagem é aumentada para melhorar a consistência e fluidez das argamassas, o acúmulo de água posteriormente evapora, ocasionando retração da matriz e redução da resistência mecânica (BEYGI *et al.*, 2014; HAACH; VASCONCELOS; LOURENÇO, 2011). Além disso, a água excedente inicialmente fica acumulada nos agregados, especialmente quando apresentam formatos planos e alongados, resultando em uma zona de transição interfacial mais fraca, reduzindo o desempenho mecânico (BEYGI *et al.*, 2014; KASU *et al.*, 2019).

Segundo Kusumawardani e Wong (2020), quando uma carga é aplicada na matriz, os agregados com formatos lamelares e alongados apresentam menor resistência em seu lado plano. Já os agregados com formatos arredondados ou cúbicos são capazes de distribuir melhor as tensões, além de otimizar a estrutura de empacotamento do sistema, apresentando maior contato da pasta em torno das partículas, resultando em um melhor intertravamento entre matriz e agregado.

Logo, a utilização do ARNS em substituição ao AMN reduz o desempenho das propriedades das argamassas e fatores como, a predominância de formas alongadas, achatadas e angulares do ARNS, o aumento na relação a/c, a redução da densidade, o aumento do teor de ar e possivelmente ZTI mais fracas, podem justificar esse efeito.

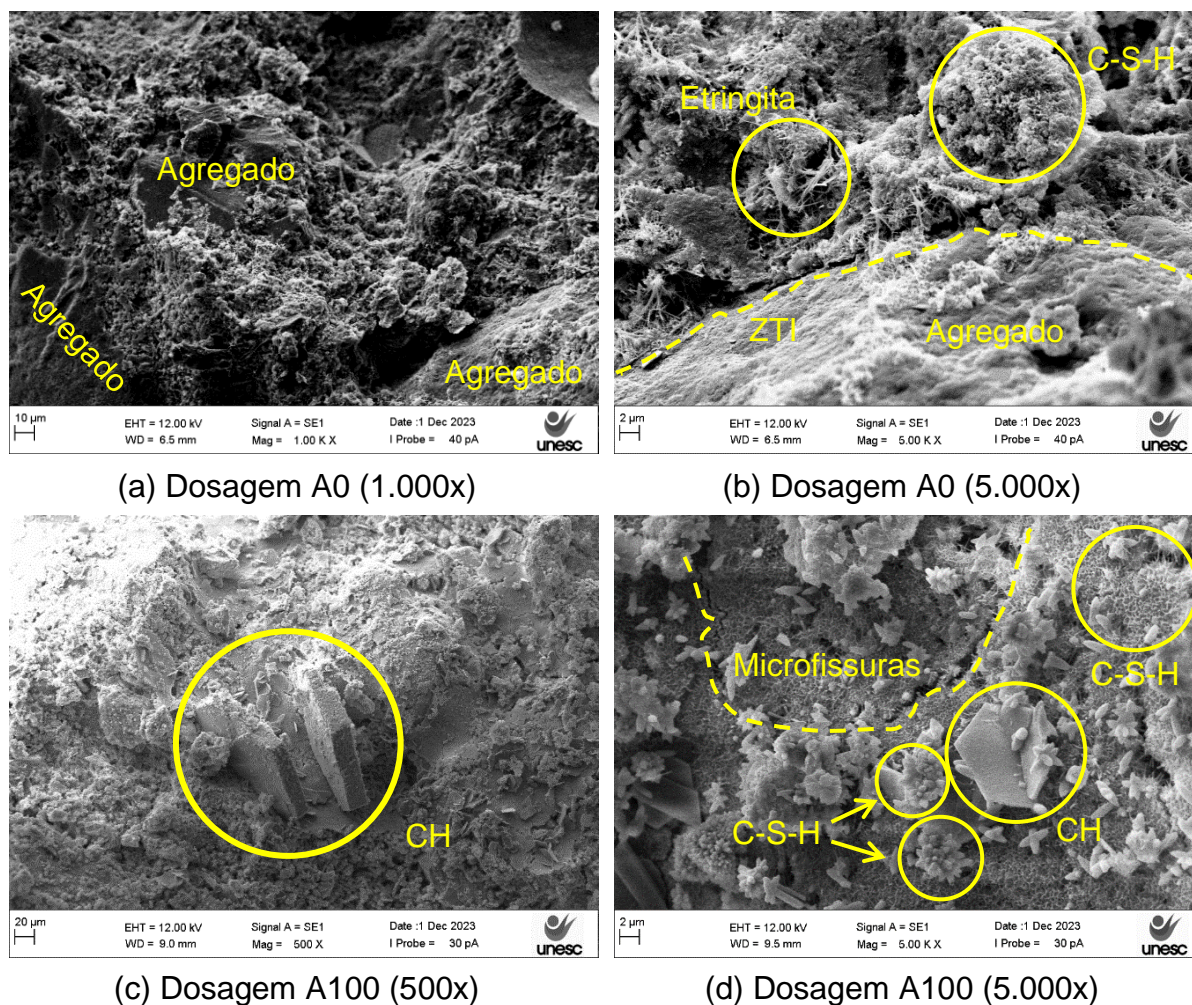
Embora as argamassas que utilizam o ARNS tenham ocasionado reduções das propriedades investigadas, considera-se que a dosagem A50+ apresenta o maior potencial para utilização no setor da construção civil. Ressalta-se que as argamassas de revestimento, do tipo chapisco, são amplamente utilizadas com dosagem em volume de 1:3 (cimento: agregado miúdo), com a finalidade de melhorar a aderência entre o substrato e a próxima camada de revestimento, além de contribuir para uniformizar a absorção do substrato (BAUER, 2019; CARASEK, 2017). Por isso, não há uma norma brasileira que aborde requisitos mínimos para sua utilização.

Mesmo com as reduções de desempenho, ainda sim, a dosagem A50+ pode ser uma alternativa viável para as argamassas convencionais, contribuindo para a redução dos custos de insumos, da demanda por minerais naturais, dos impactos

ambientais associados à exploração dos recursos e da destinação dos resíduos sólidos gerados e estocados pela mineradora.

Para analisar as possíveis alterações na morfologia superficial e composição das matrizes cimentícias, devido à utilização do ARNS, as argamassas A0 e A100 foram analisadas por MEV e as imagens são apresentadas na Figura 21.

Figura 21 – Imagens da microscopia das argamassas aos 28 dias.



Fonte: Autor (2024).

Observa-se que a morfologia da superfície da argamassa A0 apresenta uma matriz homogênea, onde os poros estão quase completamente preenchidos pelos produtos de hidratação do cimento, caracterizado pela presença de diferentes fases hidratadas como o C-S-H (flocos gelatinosos) e etringita (cristais em forma de agulha), sendo possível visualizar o contato da pasta em torno da partícula do AMN, destacando na Figura 21(a) a forte aderência da matriz com o agregado natural e na Figura 21(b), uma falha na ligação entre o agregado e a pasta, caracterizado pela ZTI.

Na dosagem A100, também pode-se identificar na Figura 21(c) e na Figura 21(d) uma matriz homogênea e densa, praticamente sem poros visíveis, preenchida pelos produtos de hidratação do cimento como o C-S-H (flocos gelatinosos e pequenos cristais fibrosos) e o CH (estrutura em forma de placas). É possível visualizar também, microfissuras na matriz das argamassas A100, o que pode ter contribuído para a redução da resistência à compressão das argamassas que utilizaram integralmente o ARNS. Não foram encontradas ZTI entre o ARNS e a matriz, possivelmente devido ao tamanho das partículas serem menores que 1,18 mm (ocasionado pelo beneficiamento industrial).

De acordo com Idiart *et al.* (2012), agregados com tamanhos de partículas inferiores a 1,0 mm não ocasionam microfissuras facilmente detectáveis experimentalmente. Com o aumento do tamanho do agregado e da sua fração volumétrica na matriz, tem-se maior quantidade de trincas na superfície destes agregados. Por isso, para agregados pequenos a quantidade de trincas nas superfícies é baixa, dificultando a detecção de zonas de transição interfacial entre os agregados miúdos e a matriz.

Em relação à influência dos agregados, os formatos arredondados ou cúbicos (identificados para o AMN), devido à maior área de contato com a pasta em torno das partículas, melhoram a estrutura de empacotamento do sistema, aumentando o intertravamento entre matriz e agregado, refletindo em incremento de resistência mecânica (KUSUMAWARDANI; WONG 2020). A redução da resistência das argamassas que utilizaram o ARNS pode ter sido parcialmente minimizada devido à rugosidade superficial do resíduo. Segundo Zhao, Fan e Sun (2014), a superfície rugosa de agregados triturados pode melhorar a aderência entre os agregados e a pasta, refletindo em melhor desempenho mecânico.

#### **5.4.2 Análise do RNS como agregado miúdo em concretos**

Para o desenvolvimento das curvas de dosagens, preliminarmente investigou-se cinco dosagens, variando o teor de agregados secos totais de 2,0 até 8,0 e o teor de argamassa de 50 até 54%. Conforme critério estabelecido neste estudo para aceitação, todos os concretos apresentaram aspecto argamassado e coeso e, após investigação experimental, o teor de argamassa ideal foi igual a 54% para todas as dosagens investigadas. A Tabela 11 apresenta informações dos concretos, após 7 dias de cura, para a construção das curvas de dosagem pelo método IPT/EPUSP.

Tabela 11 – Parâmetros obtidos para o desenvolvimento das curvas de dosagem.

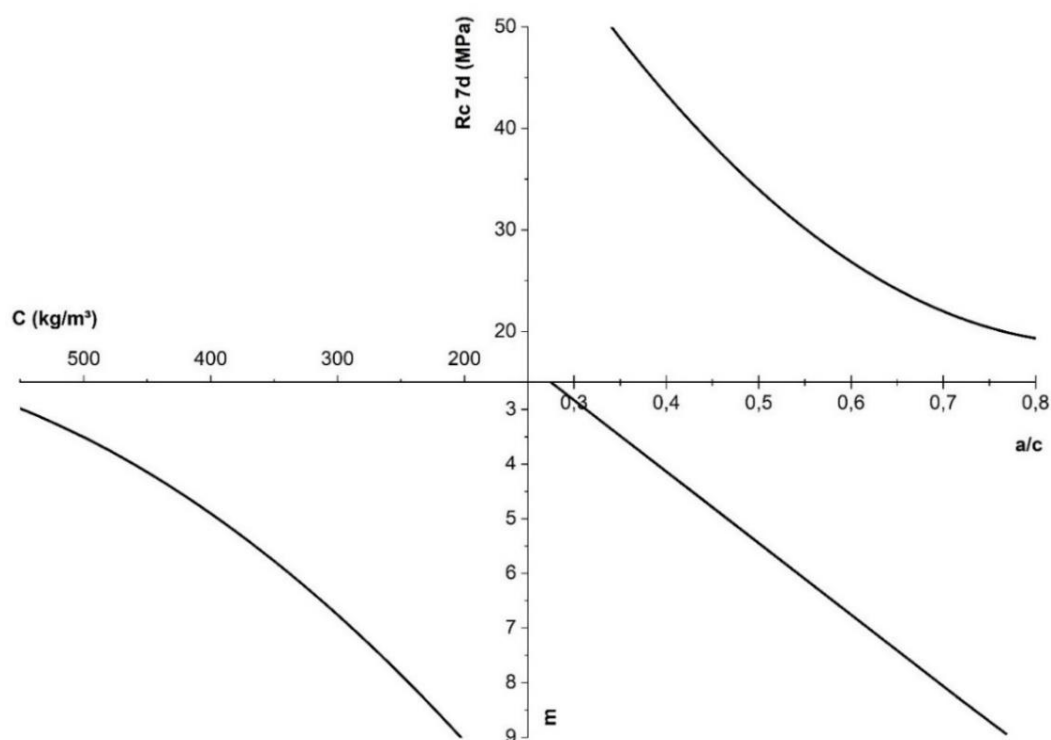
Agregado	m	$\alpha$ (%)	Dosagem unitária em massa					Slump (mm)	Rc (7d) (MPa)
			c	a	p	x	adt. (%)		
AMN	2,00	54	1,00	0,62	1,38	0,27	1,50	80	61,10
	3,50	54	1,00	1,43	2,07	0,34	1,50	100	46,50
	5,00	54	1,00	2,24	2,76	0,44	1,50	80	39,57
	6,50	54	1,00	3,05	3,45	0,56	1,50	90	31,28
	8,00	54	1,00	3,86	4,14	0,72	1,50	80	20,58

m = agregados secos totais,  $\alpha$  = teor de argamassa, c = cimento, a = agregado miúdo, p = agregado graúdo, x = água, adt. = aditivo superplastificante; *slump* = abatimento do concreto e Rc = resistência à compressão.

Fonte: Autor (2024).

As curvas de dosagem obtidas experimentalmente, pelo método proposto pelo IPT/EPUSP, são apresentadas na Figura 22. Para o seu desenvolvimento, utilizou-se os agregados naturais (AMN e AGN), o cimento CP V, uma fluidez com abatimento de  $90 \pm 10$  mm, um teor de argamassa de 54%, considerando uma resistência à compressão aos 7 dias entre 20 e 50 MPa. Foram realizados ajustes simples nas curvas, sendo polinomial de grau 2 para a resistência à compressão ( $R^2=0,9545$ ) e consumo de cimento ( $R^2=0,9962$ ) e linear para a relação água/cimento ( $R^2=0,9700$ ).

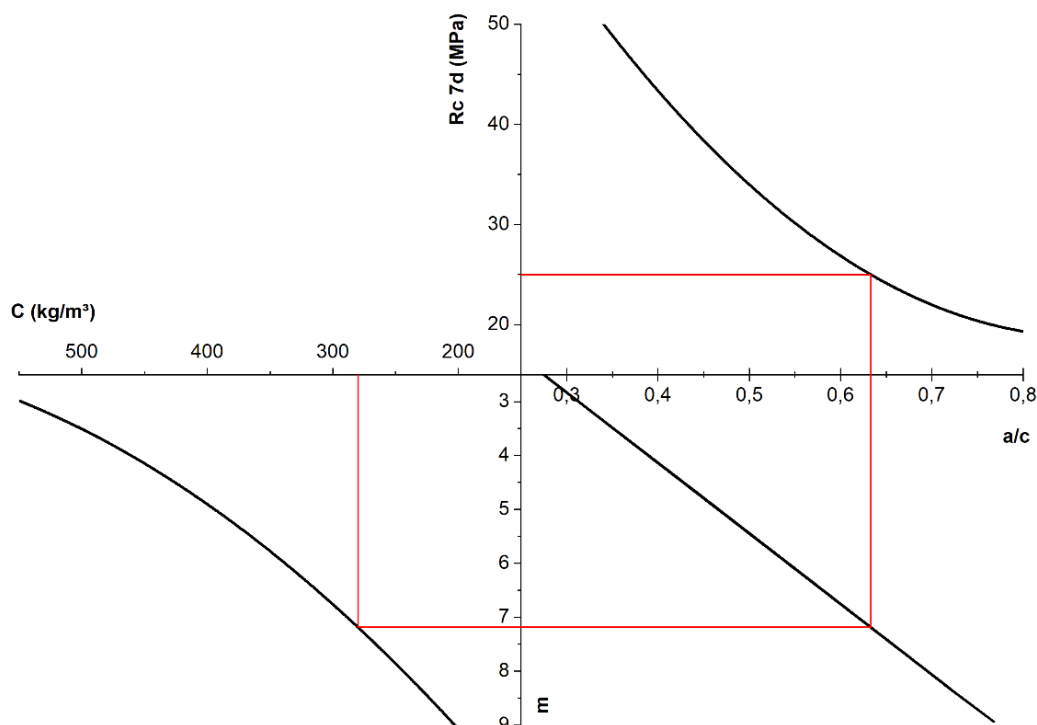
Figura 22 – Curvas de dosagem dos concretos pelo método IPT/EPUSP.



Fonte: Autor (2024).

A partir das curvas de dosagem plotadas, foram obtidas graficamente, conforme apresentado na Figura 23, a relação  $a/c$ , o teor de materiais secos totais e o consumo de cimento, necessários para a dosagem dos concretos, considerando uma resistência mecânica à compressão aos 7 dias de 25 MPa.

Figura 23 - Parâmetros obtidos das curvas para dosagem dos concretos.



Fonte: Autor (2024).

Desta forma, definiu-se as dosagens para os concretos de referência (C1-0 e C2-0) e a partir destes, foram propostas substituições para investigação do uso do ARNS. As dosagens resultantes dos estudos experimentais, bem como as respectivas siglas, são apresentadas na Tabela 12.

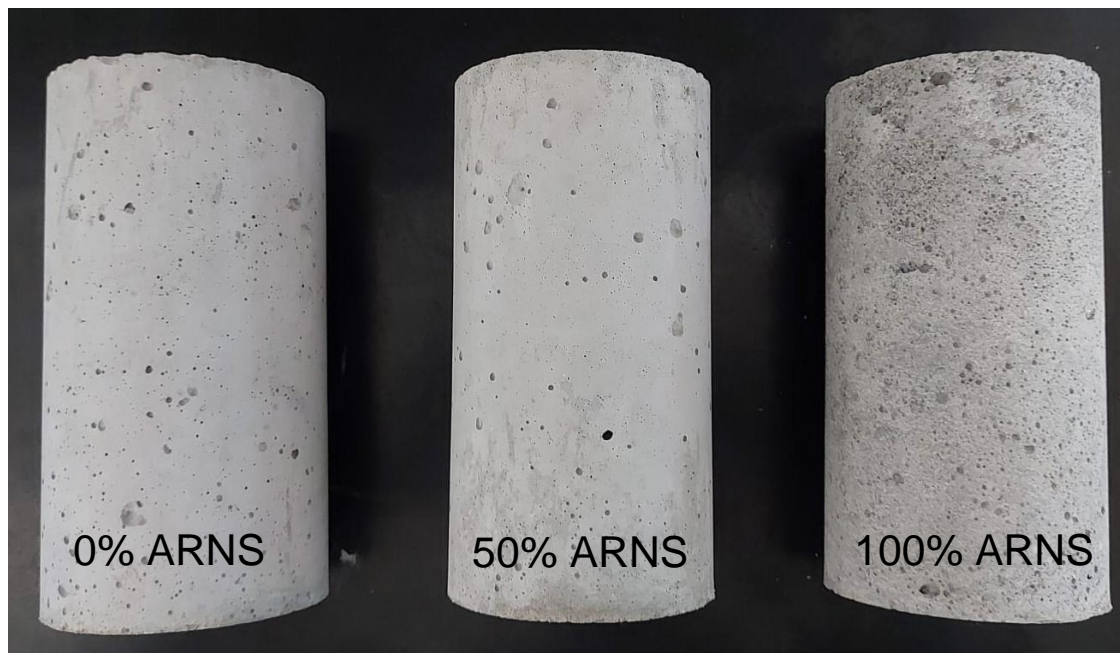
Tabela 12 – Dosagem unitária em massa dos concretos estudados.

<b>Sigla</b>	<b>ARNS</b>	<b>CP V</b>	<b>AMN</b>	<b>ARNS</b>	<b>AGN</b>	<b><math>a/c</math></b>	<b>adit.</b>	<b><i>slump</i></b>
<b>C1-0</b>	0%	1,00	3,42	0,00	3,76	0,58	1,50%	80 mm
<b>C1-50</b>	50%	1,00	1,71	1,71	3,76	0,67	1,50%	80 mm
<b>C1-100</b>	100%	1,00	0,00	3,42	3,76	0,78	1,50%	80 mm
<b>C2-0</b>	0%	1,00	3,42	0,00	3,76	0,70	0,00%	80 mm
<b>C2-50</b>	50%	1,00	1,71	1,71	3,76	0,70	0,30%	80 mm
<b>C2-100</b>	100%	1,00	0,00	3,42	3,76	0,70	1,20%	80 mm

Fonte: Autor (2024).

Comparando os concretos C1 e C2, como os mesmos teores de ARNS, não foram identificadas diferenças visuais e o acabamento superficial dos concretos estudados está representado na Figura 24. Observa-se que a substituição do AMN por ARNS em 50% não promoveu alterações significativas. No entanto, a substituição em 100% elevou o teor de poros e a rugosidade nas superfícies dos concretos.

Figura 24 – Imagem dos concretos C2 desenvolvidos com o AMN e com o ARNS.



Fonte: Autor (2024).

Analisando as três dosagens que compõem os concretos C1 na Tabela 12, observa-se que a utilização do ARNS em substituição ao AMN provoca um significativo aumento da demanda de água, elevando a relação  $a/c$  em, aproximadamente, 16% para o concreto C1-50 e em 34% para o concreto C1-100.

Esse aumento da relação  $a/c$  observado está associado à forma, à textura e à distribuição granulométrica dos agregados miúdos. A forma irregular, a textura rugosa, bem como a redução do tamanho de partícula do ARNS demandaram água excedente para manter a mesma fluidez dos concretos (FARIAS; PALMEIRA; BEJA, 2017; NEVILLE, 2016; WESTERHOLM *et al.*, 2008). Esses resultados estão de acordo com os relatados por Westerholm *et al.* (2008), onde o abatimento do concreto variou de 5 até 200 mm em função do tipo de agregado miúdo utilizado. Segundo o autor, a presença de minerais micáceos, formados por silicatos sobrepostos em camadas distintas, também tem um efeito negativo na fluidez dos concretos e, de acordo com a revisão de literatura realizada, podem estar presentes na nefelina sienito.

O aumento da relação a/c é utilizado como estratégia para melhorar as características dos concretos no estado fresco, como o aspecto, a textura e a fluidez. No entanto, sabe-se que o aumento da relação a/c está intimamente ligada à redução do seu desempenho mecânico. O volume de água excedente está relacionado com a alteração de volume do concreto, pois a perda da água livre por evaporação induz ao efeito de retração por secagem, ocasionando tensões devido à retração e surgimento de fissuras (ZHANG; ZAKARIA; HAMA, 2013).

Por essa razão, avaliaram-se também concretos com a mesma relação a/c, sendo necessário, de forma compensatória, o aumento no teor de aditivo plastificante. Embora o limite de utilização do aditivo 1, recomendado pelo fabricante, seja de 3,0% em relação à massa de cimento, esse mesmo teor não foi capaz de produzir concretos com a fluidez desejada de  $90 \pm 10$  mm ao utilizar 100% do ARNS. Deste modo, foi necessário a substituição do aditivo 1 pelo aditivo 2, que possuiu maior eficiência.

Para obter uma fluidez de  $90 \pm 10$  mm para o concreto C2-100, foi necessário um teor de aditivo de 1,2% e uma relação a/c igual a 0,70. Essa relação a/c foi então mantida constante para as demais dosagens C2, investigando o teor de aditivo necessário para manutenção da fluidez desejada. Os resultados, apresentados na Tabela 12, indicam que o concreto C2-50 demanda um aumento no teor do aditivo 2 de 30%, enquanto o concreto C2-100 demanda um aumento de 120%, quando comparados ao concreto de referência C2-0.

Resultados similares foram obtidos por Westerholm *et al.* (2008), onde o uso de diferentes agregados miúdos artificiais de britagem demandaram cerca de 3,6 vezes a mais de aditivo superplastificante para manutenção da fluidez dos concretos, em relação ao agregado miúdo natural.

Os resultados obtidos para o fator  $R^2$  são apresentados na Tabela 13, possibilitando verificar a influência do teor de ARNS em substituição ao AMN nas propriedades dos concretos. Foi considerado para os valores inferiores a 0,70 que o modelo não explica bem os dados. Valores para  $R^2$  entre 0,7 e 0,9 indicam um ajuste bom do modelo aos dados. Já os valores superiores a 0,90 se ajustam fortemente e são capazes de representar o modelo e descrever o seu comportamento.

Nota-se que para o concreto C1, apenas a propriedade de densidade no estado fresco não pode ser explicada pelo modelo. Já para o concreto C2, apenas as propriedades de índice de vazios e de absorção de água não podem ser explicadas pelo modelo, independentemente da idade analisada (7 ou 28 dias).

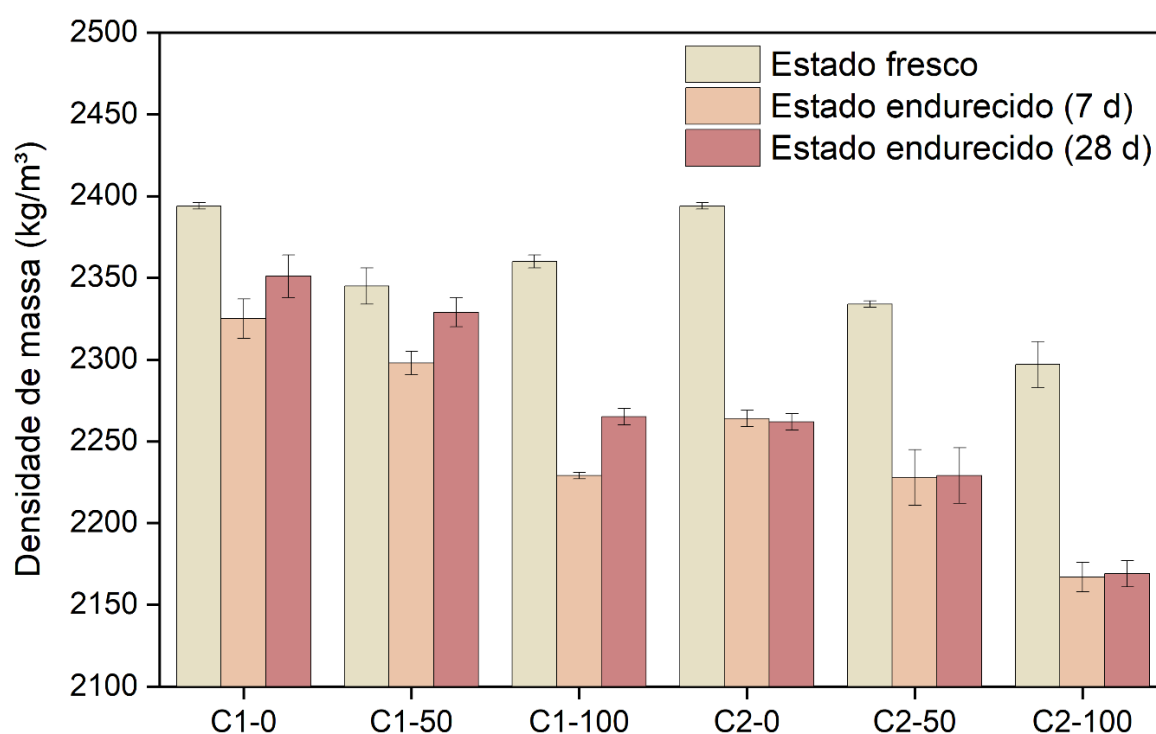
Tabela 13 – R<sup>2</sup> das propriedades dos concretos em função do teor de ARNS.

Propriedades	Fator R <sup>2</sup>	
	C1	C2
Densidade no estado fresco	0,4585	0,9816
Densidade no estado endurecido (7 d)	0,9400	0,9783
Densidade no estado endurecido (28 d)	0,9264	0,9727
Teor de ar	0,7500	0,7500
Índice de vazios (7 d)	0,9674	0,2309
Índice de vazios (28 d)	0,9971	0,0061
Absorção de água (7 d)	0,9753	0,4366
Absorção de água (28 d)	0,9961	0,4515
Compressão (7 d)	0,9949	0,7262
Compressão (28 d)	0,9815	0,9991

Fonte: Autor (2024).

Os resultados para as densidades dos concretos no estado fresco e no estado endurecido são apresentados na Figura 25. Verifica-se uma tendência de decréscimo das densidades dos concretos devido à utilização do ARNS.

Figura 25 – Densidade dos concretos nos estados fresco e endurecido.



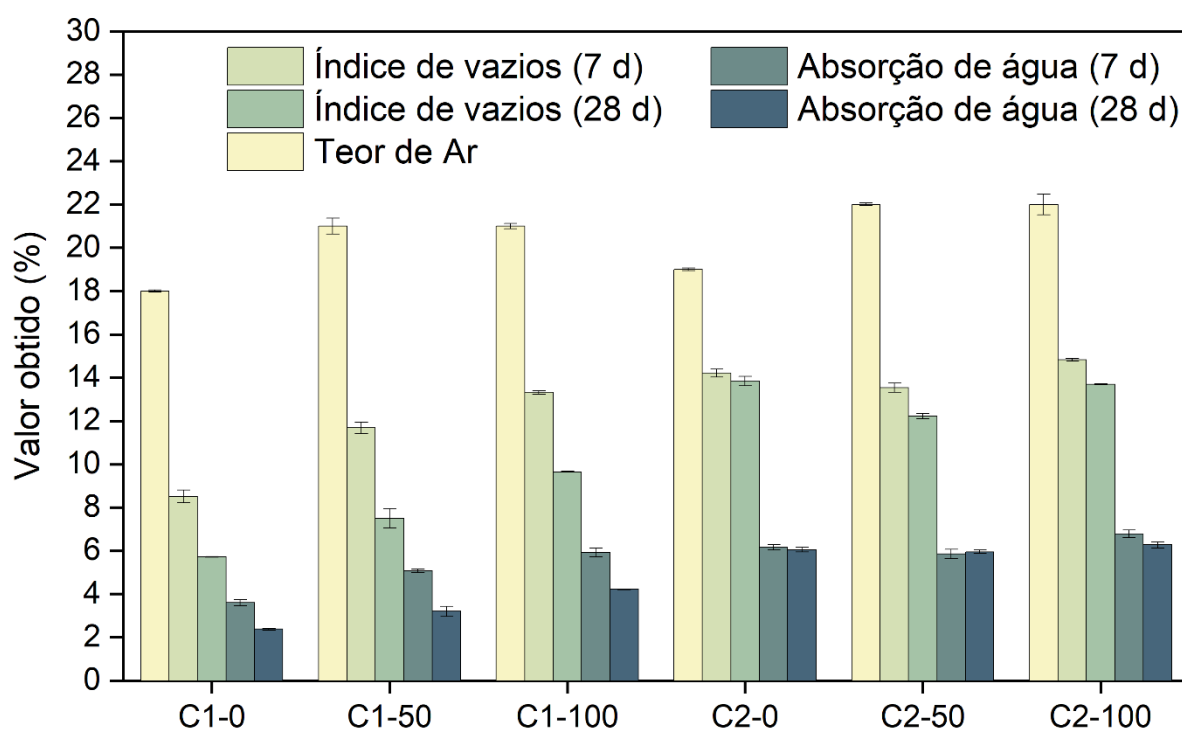
Fonte: Autor (2024).

Analisando a densidade dos concretos no estado fresco, o menor valor obtido foi de, aproximadamente,  $2300 \text{ kg/m}^3$  para o C2-100 e o maior valor observado foi de, aproximadamente,  $2400 \text{ kg/m}^3$  para o C2-0, representando uma variação de apenas 4%. Em relação à densidade no estado endurecido, observa-se um comportamento semelhante onde, aos 7 dias, a menor densidade foi de  $2167 \text{ kg/m}^3$  para o C2-100 e a maior densidade foi de  $2325 \text{ kg/m}^3$  para o C1-0, representando uma variação de 7%. Aos 28 dias, as densidades variaram de  $2170 \text{ kg/m}^3$  para o C2-100 até  $2350 \text{ kg/m}^3$  para o C1-0, representando uma diferença percentual de, aproximadamente, 8% e indicando que não houveram diferenças consideráveis para as densidades dos concretos entre as idades de 7 e 28 dias.

Desta forma, os diferentes fatores estudados como a maior utilização do ARNS em substituição ao AMN, as variações nas relações a/c, o tipo de aditivo plastificante, o teor dos aditivos ou a combinação dos fatores, não alteram de forma expressiva a densidade dos concretos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

A Figura 26 apresenta os valores para as propriedades de teor de ar, índice de vazios e absorção de água dos concretos onde observa-se, para todos os resultados, uma tendência de aumento nas propriedades devido a maior utilização do ARNS.

Figura 26 – Índice de vazios, absorção de água e teor de ar dos concretos.



Fonte: Autor (2024).

Os resultados para o teor de ar dos concretos variaram de 18% (C1-0) a 22% (C2-100), representando uma diferença de, aproximadamente, 22% entre eles. O teor de ar dos concretos pode ser afetado por fatores como a relação a/c, o tempo e os procedimentos de mistura, o uso de aditivos e também pelos insumos utilizados (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

Nota-se que para ambos os concretos, C1 e C2, há um incremento no teor de ar com a utilização do ARNS. No entanto, o maior uso de ARNS (100%) não altera essa propriedade. Também não foram encontradas diferenças significativas entre os concretos C1 e C2 para um mesmo teor de substituição do AMN por ARNS. Sendo assim, os efeitos combinados entre os parâmetros relação a/c, tipo e teor de aditivo parecem não afetar o teor de ar para os concretos que utilizam o ARNS.

Os resultados obtidos para os índices de vazios dos concretos exibiram valores entre 9 e 15% para os 7 dias e entre 6 e 14% para os 28 dias. As diferenças percentuais entre os concretos são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Comparações percentuais entre os índices de vazios dos concretos.

<b>Concretos com diferentes teores de ARNS</b>			
<b>Dosagens</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>Observações</b>
C1-0 e C1-50	37%	31%	Relações a/c diferentes, mesmo teor do aditivo 1, 0% ARNS e 50% ARNS
C1-0 e C1-100	57%	69%	Relações a/c diferentes, mesmo teor do aditivo 1, 0% ARNS e 100% ARNS
C2-0 e C2-50	-5%	-12%	Relações a/c iguais, diferentes teores do aditivo 2, 0% ARNS e 50% ARNS
C2-0 e C2-100	4%	-1%	Relações a/c diferentes, diferentes teores do aditivo 2, 0% ARNS e 100% ARNS
<b>Concretos com o mesmo teor de ARNS</b>			
<b>Dosagens</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>Observações</b>
C1-0 e C2-0	67%	142%	Relações a/c diferentes, C2 sem aditivo, concretos com 0% de ARNS
C1-50 e C2-50	16%	63%	Relações a/c próximas, uso de aditivos, concretos com 50% de ARNS
C1-100 e C2-100	11%	42%	Relações a/c diferentes, uso de aditivos, concretos com 100% de ARNS

Fonte: Autor (2024).

Os concretos C1 possuem relações a/c distintas, mesmo teor de aditivo plastificante 1 e diferentes teores de ARNS. Já os concretos C2 possuem uma mesma relação a/c, diferentes teores do aditivo plastificante 2 e também de ARNS. Os resultados sugerem que o aumento da relação a/c associado ao maior uso do ARNS, ocasionam uma elevação do índice de vazios dos concretos C1. Isso pode ser atribuído à evaporação da água excedente, necessária para manter a fluidez dos concretos que utilizam o ARNS. Entretanto, o aditivo plastificante 2 foi capaz de manter constante as relações a/c nos concretos C2 e parece ser capaz de controlar o índice de vazios, atenuando os efeitos das maiores substituições do AMN por ARNS.

Nota-se que as maiores diferenças foram obtidas entre os concretos de referência (C1-0 e C2-0), onde o concreto C2 não faz uso de aditivo plastificante e tem maior relação a/c, sendo estes fatores mais críticos do que o teor de ARNS utilizado. Observa-se, ainda, que o aumento da idade de cura para os concretos C1 ocasiona uma redução mais acentuada do índice de vazios, em torno de 30%, enquanto nos concretos C2 esse efeito é atenuado e as reduções foram menores que 10%.

As maiores variações nos índices de vazios em função do aumento das relações a/c e a redução do índice de vazios com o aumento da idade de cura, corroboram com resultados obtidos por Mao, Liu e Shi (2021) e Zhang, Zakaria e Hama (2013). Os autores relatam que as reduções nos índices de vazios dos concretos em idades iniciais, podem ser ocasionados pela saída da água excedente por evaporação e pela conseqüente retração do conjunto, onde a mudança do volume do concreto está relacionada com o volume de água perdido. Para idades mais avançadas, as reduções dos índices de vazios são ocasionadas pelo preenchimento parcial dos vazios devido ao avanço volumétrico dos compostos hidráulicos formados.

Em relação aos teores de absorção de água, aos 7 dias os resultados ficaram entre 4% (C1-0) e 7% (C2-0) e aos 28 dias, entre 2% (C1-0) e 6%(C2-0). Segundo Golewski (2023), concretos que apresentam absorção de água entre 4 e 6% podem ser considerados de boa qualidade e auxiliam a garantir uma durabilidade adequada. Entre os principais fatores que afetam o teor de absorção de água, destacam-se os agregados utilizados, a porosidade capilar, o tamanho e a distribuição dos poros, a densificação e a composição de fases da matriz (RAZAK; CHAI; WONG, 2004).

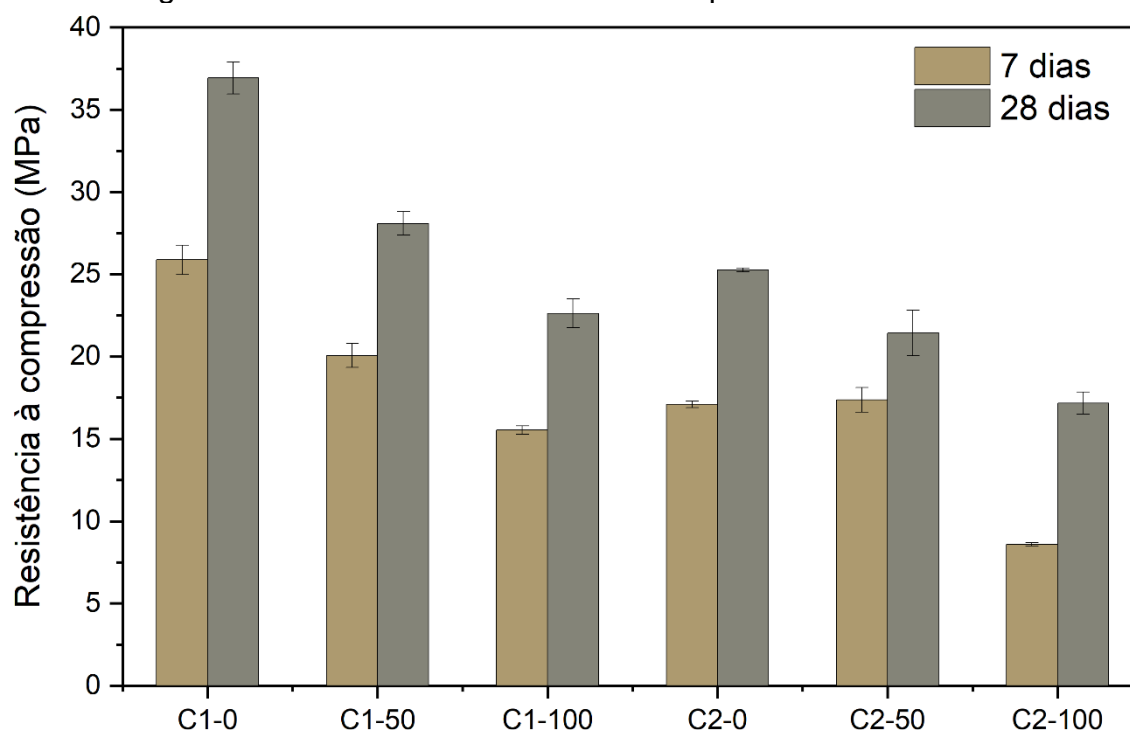
Observa-se para os concretos C1, que o maior uso do ARNS em substituição ao AMN, associado a uma maior relação a/c, ocasionaram um aumento da absorção de água. Já para os concretos C2, o aumento do teor de ARNS, associado ao maior

teor de aditivo 2, ocasionaram uma manutenção dos valores para a absorção de água que se mantiveram constantes. Esses resultados sugerem que a relação a/c, o tipo e o teor de aditivo, parecem exercer maior influência no aumento da absorção de água nos concretos do que as substituições do AMN por ARNS, mas os fatores combinados podem ter contribuído.

De fato, segundo Gupta, Chaudhary e Sharma (2014), a relação a/c e o teor de resíduos utilizados em substituição ao agregado miúdo natural, influenciam a porosidade dos concretos, afetando a sua capacidade de absorção de água, onde matrizes menos densas conduzem a maiores absorções.

Os concretos produzidos foram mantidos em cura submersa em água saturada com cal até as idades de 7 e 28 dias, quando foram retificados e rompidos à compressão. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 27, onde observa-se uma redução da resistência devido a substituição do AMN por ARNS.

Figura 27 – Resistência mecânica à compressão dos concretos.



Fonte: Autor (2024).

A resistência média do concreto C1-0 foi de, aproximadamente, 26 MPa aos 7 dias, o que demonstra que o método de dosagem adotado, IPT-EPUSP, foi eficaz para obtenção da resistência estipulada em 25 MPa. No entanto, o outro concreto de referência, C2-0, apresentou resistência inferior à desejada, sendo o valor médio de,

aproximadamente, 17 MPa aos 7 dias. Todavia, vale ressaltar que a relação a/c deste concreto foi aumentada de 0,58 para 0,70, o que pode justificar o decréscimo de, aproximadamente, 32% na resistência à compressão. Além disso, foram identificadas alterações nas propriedades destes concretos, como a redução da densidade no estado endurecido, aumento do índice de vazios e da absorção de água.

Para os concretos C1 aos 7 dias, a substituição do AMN por ARNS associado ao aumento da relação a/c, reduziu o desempenho em, aproximadamente, 22 e 40%, para C1-50 e C1-100, respectivamente, em comparação com o C1-0. Aos 28 dias, as reduções foram similares sendo de 24% para C1-50 e 39% para C1-100. As reduções nas resistências à compressão já eram esperadas devido ao aumento das relações a/c necessárias para manter a fluidez dos concretos.

Analisando os concretos C2, associados ao maior uso de aditivo plastificante e com a mesma relação a/c, aos 7 dias a substituição do AMN por ARNS na proporção de 50% (C2-50), ocasionou um desempenho mecânico similar ao concreto de referência (C2-0). No entanto, a substituição integral do AMN por ARNS (C2-100) reduziu a resistência à compressão em 50%. Já aos 28 dias de idade, o aumento no teor de ARNS promoveu uma redução da resistência de, aproximadamente, 15% para o C2-50 e 32% para o C2-100, em comparação com o C2-0.

A redução da resistência à compressão observada para os concretos, pode ser justificada pelas relações a/c utilizadas. Segundo Beygi *et al.* (2014), uma relação a/c alta ocasiona decréscimo da resistência à compressão, em razão da formação de ZTI mais fracas, redução da aderência entre o agregado e a matriz, onde a linha de fratura acontece na superfície dos agregados. Esse fato não ocorre quando se utilizam baixas relações a/c, com forte aderência entre o agregado e a matriz, onde o modo de fratura acontece pelo interior do agregado, aumentando a resistência à compressão.

Almada *et al.* (2020) acrescentam que a água da dosagem que não ficou quimicamente ligada durante o processo de hidratação, evapora deixando poros na matriz e, conseqüentemente, reduz a resistência. Além disso, a perda da água por evaporação induz o efeito de retração por secagem, ocasionando tensões e surgimento de fissuras que fragilizam o material (ZHANG; ZAKARIA; HAMA, 2013).

Em relação à influência do agregado, os formatos arredondados ou cúbicos são capazes de distribuir melhor as tensões, apresentam maior contato da pasta em torno das partículas e otimizam a estrutura de empacotamento resultando em um melhor intertravamento do sistema e em um conseqüente incremento de desempenho

mecânico (KUSUMAWARDANI; WONG 2020). Segundo Zhao, Fan e Sun (2014), os minerais presentes em resíduos podem ter rigidez e dureza inferiores aos contidos em agregados naturais, contribuindo para a diminuição da resistência.

Aos 28 dias de idade, houve um aumento na resistência à compressão para os concretos estudados superior a 40% em relação à resistência obtida aos 7 dias, exceto para os concretos C2-50 e C2-100, onde os incrementos na resistência foram de, aproximadamente, 23 e 100%, respectivamente. Esse resultado fornece indícios de que o maior teor do aditivo 2 e a sua composição, podem ter influenciado na disponibilidade da água para as reações de hidratação nas idades iniciais, devido à dispersão do cimento por estabilização estérica (barreira física) ao invés da repulsão eletrostática (AİTCIN; FLATT, 2016).

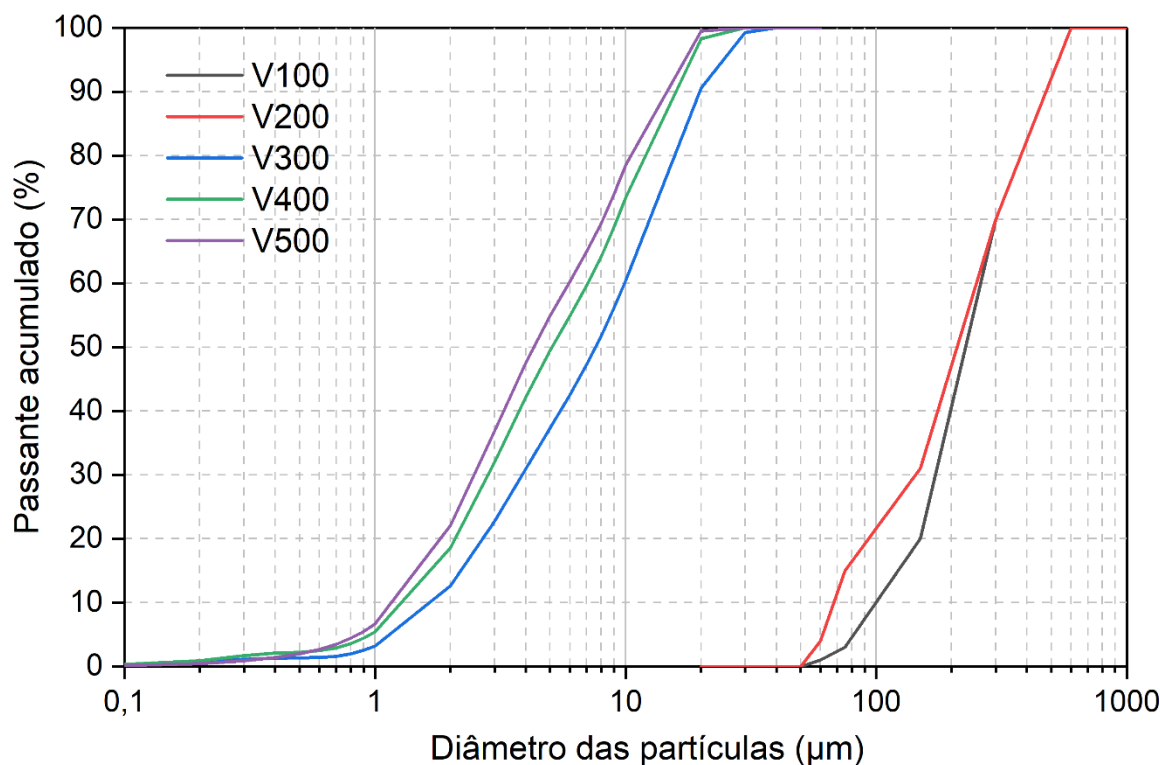
Similar ao relatado para a resistência mecânica das argamassas, para os concretos estudados a utilização do ARNS em substituição ao AMN reduz o desempenho mecânico à compressão. Fatores como o aumento das relações a/c, a predominância de partículas alongadas, achatadas e angulares do ARNS, o maior índice de vazios e, possivelmente, ZTI mais fracas, podem justificar as reduções observadas entre as dosagens.

Entretanto, mesmo com as reduções de desempenho observadas para as propriedades de interesse investigadas, considera-se que a dosagem C2-50 pode ser uma alternativa viável para os concretos convencionais, pois apresentou desempenho similar ao concreto de referência C2-0. Contudo, recomenda-se que haja uma redução na relação a/c, ocasionada pelo aumento do teor do aditivo plastificante 2, para que se atinja a resistência à compressão mínima estabelecida de 25 MPa.

#### **5.4.3 Análise do RNS como material cimentício suplementar**

Como o tamanho das partículas do RNS eram inadequadas para o uso como MCS, esta tese investigou procedimentos, conforme parâmetros apresentados na Tabela 4, para a cominuição do material com possível ativação da pozolanicidade e aumento da reatividade. Preliminarmente, investigou-se a influência da variação da velocidade de rotação. Os resultados podem ser observados na Figura 28 e também na Tabela 15, que apresenta o diâmetro correspondente no qual 50% (D50) e 90% (D90) das partículas são inferiores e também o teor de material retido na peneira de malha de 75 µm, considerado como resíduo da moagem, devido à baixa reatividade.

Figura 28 – Curvas de distribuição do tamanho de partículas do RNS em função da velocidade de rotação (rpm).



Fonte: Autor (2024).

Tabela 15 – Valores de tamanho de partículas do RNS em função da velocidade de rotação (rpm) com tempo fixo de 10 min.

Parâmetros	V100	V200	V300	V400	V500
D50 (µm)	227,34	210,32	7,60	5,09	4,29
D90 (µm)	476,22	476,22	19,69	14,44	13,01
Retido #75 µm (%)	95,71	83,99	20,18	4,68	1,39

Fonte: Autor (2024).

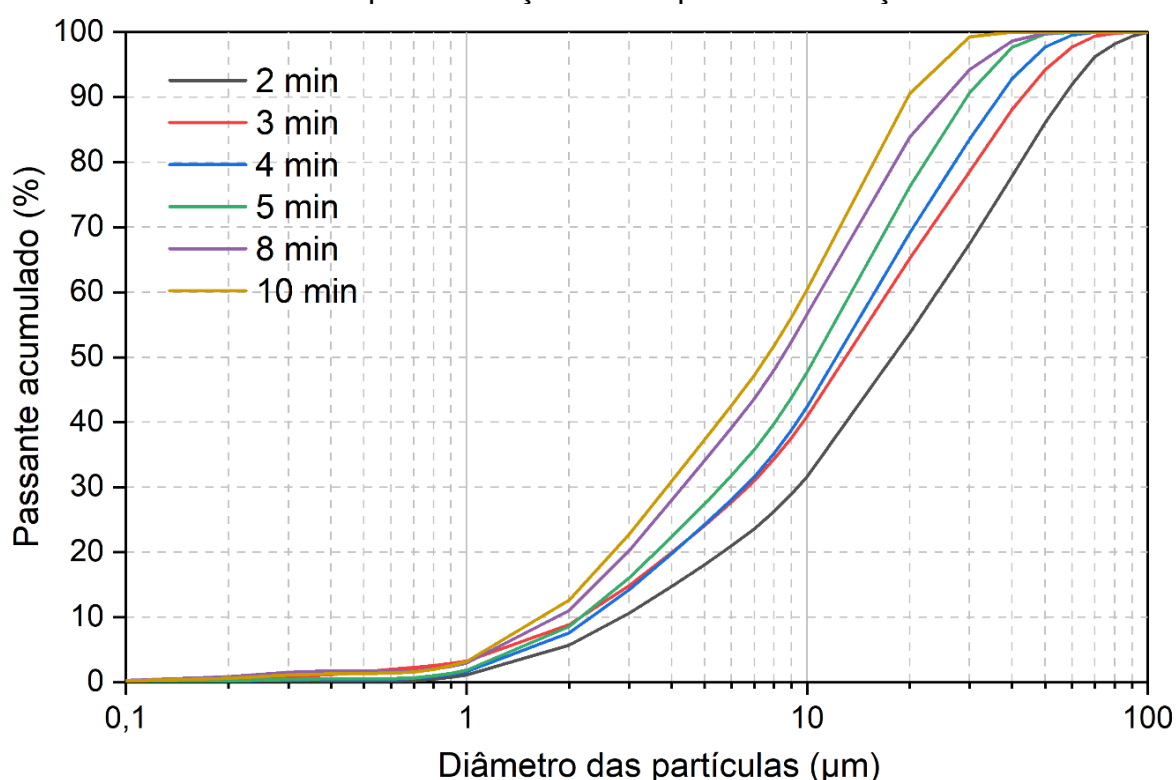
A metodologia utilizada na preparação das amostras para análise do tamanho de partículas, incluiu o peneiramento prévio na peneira de 75 µm. As velocidades de 100 rpm (V100) e 200 rpm (V200) foram ineficazes, onde o teor de material retido na peneira foi de, aproximadamente, 96 e 84%, respectivamente. A velocidade de 300 rpm (V300) mostrou melhora significativa com um teor de material retido de, aproximadamente, 20%. Já as velocidades de 400 rpm (V400) e 500 rpm (V500) foram consideradas muito eficazes, apresentando menos de 5% de material retido.

Percebe-se que a V100 e a V200 não conseguiram cominuir o RNS de maneira eficiente, permanecendo o material de forma inadequada para aplicação como MCS. Desta forma, essas velocidades foram desconsideradas como possibilidade de

cominuição. No entanto, a V300, a V400 e a V500 conseguiram reduzir de maneira eficaz o RNS. Para essas três velocidades, observou-se que os D90 dos materiais ficaram inferiores a 20  $\mu\text{m}$  e que os D50 ficaram inferiores a 8  $\mu\text{m}$ .

Embora a V500 tenha promovido a maior cominuição, julgou-se que as diferenças observadas em relação à V300 e à V400 não eram suficientes para justificar o aumento da energia de moagem. Assim, investigou-se apenas para essas velocidades a influência do tempo, de 2 min a 10 min (T2 a T10), na cominuição do RNS. Os resultados para a influência do tempo no processo de cominuição com a V300 são apresentados na Figura 29 e com a V400 são apresentados na Figura 30.

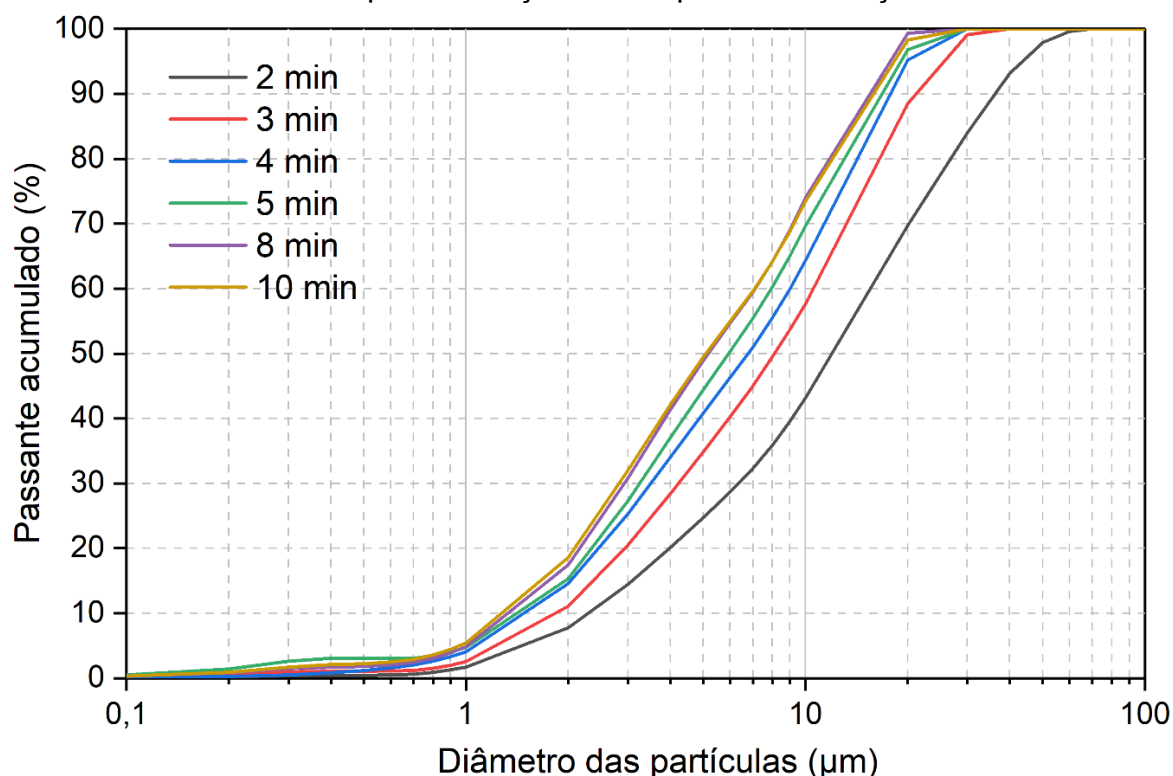
Figura 29 – Curvas de distribuição do tamanho de partículas do RNS na velocidade de 300 rpm em função do tempo de cominuição.



Fonte: Autor (2024).

Para as curvas da V300, observa-se que os incrementos nos tempos de processamento resultaram em uma redução gradativa dos tamanhos de partículas, sendo possível identificar diferenças entre todas as curvas de distribuição. Em relação à V400, os dois últimos tempos de processamento adotados resultaram em curvas muito similares e, portanto, a utilização de incrementos no tempo de processamento superiores a 8 min indicam desperdícios de energia.

Figura 30 – Curvas de distribuição do tamanho de partículas do RNS na velocidade de 400 rpm em função do tempo de cominuição.



Fonte: Autor (2024).

Fica evidente que menores tempos de processamento e menores velocidades de rotação ocasionam menores cominuições e geram maiores teores de resíduos. Nota-se que os incrementos de tempo adotados experimentalmente promovem uma redução gradativa do tamanho das partículas, sem aumentos expressivos entre elas, tanto para a V300 como para a V400, e todas as curvas apresentaram formato contínuo e bem graduado. A Tabela 16 apresenta os parâmetros obtidos em relação a variação do tempo de cominuição com as velocidades V300 e V400.

Tabela 16 – Valores de tamanho de partículas do RNS para as velocidades de 300 rpm e 400 rpm em função do tempo de cominuição.

Velocidade	Finura	T2	T3	T4	T5	T8	T10
<b>V300</b>	D50 (µm)	17,88	13,01	12,21	10,58	8,44	7,60
	D90 (µm)	56,20	42,64	36,28	29,39	25,01	19,69
	Retido #75 µm (%)	61,95	52,14	39,76	33,87	21,93	20,18
<b>V400</b>	D50 (µm)	11,98	8,12	6,77	5,94	5,17	5,09
	D90 (µm)	35,96	20,78	17,15	15,73	14,44	13,82
	Retido #75 µm (%)	29,14	20,28	14,30	9,48	5,49	4,68

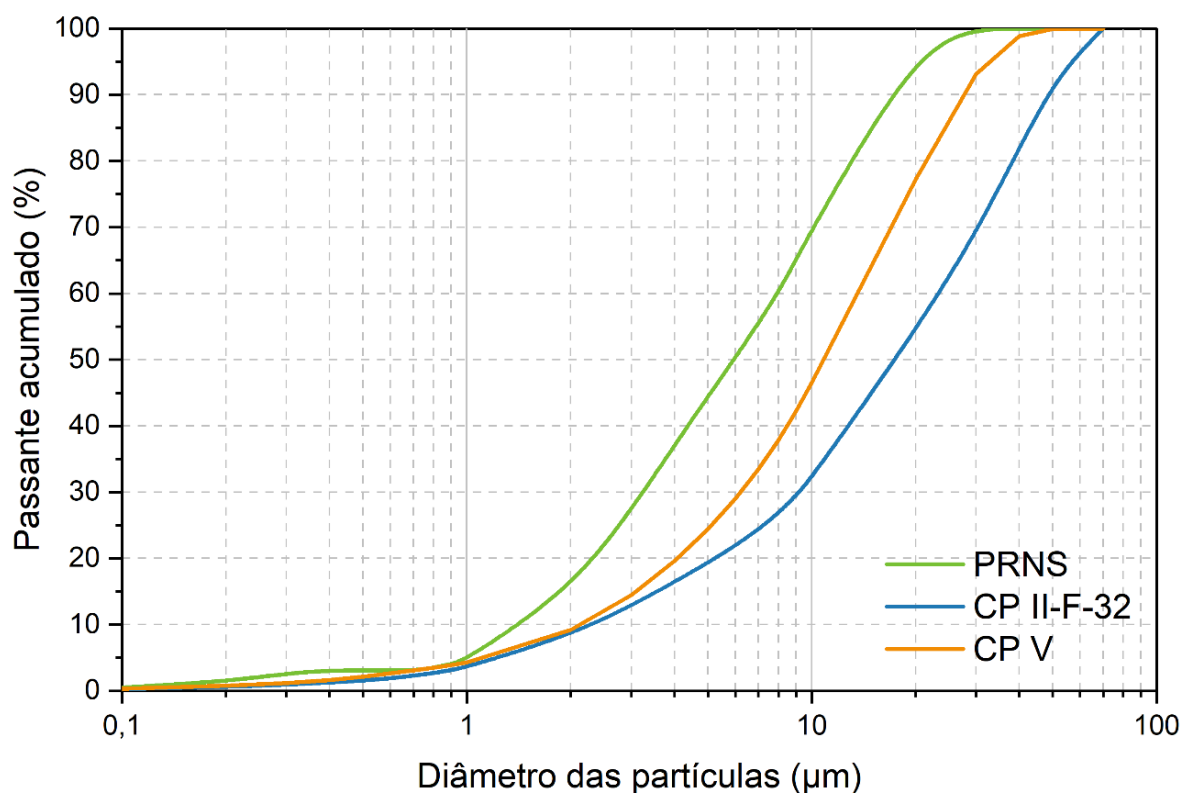
Fonte: Autor (2024).

O estudo dos parâmetros de velocidade de rotação e tempo de processamento, objetivaram encontrar para o RNS um procedimento capaz de produzir um material fino, similar aos cimentos Portland utilizados nesta pesquisa, para que fosse possível substituir parcialmente o cimento de maneira adequada.

Para a V400, os tempos T5, T8 e T10 apresentaram valores muito similares para os parâmetros D50 e D90. Como o menor teor de resíduo (material retido na peneira de 75  $\mu\text{m}$ ) foi de, aproximadamente, 5% considerou-se aceitáveis os processamentos que apresentaram valores inferiores a 10%.

Nesse sentido, com base nos resultados da Tabela 16, foi selecionada a amostra com velocidade de 400 rpm e com o tempo de 5 min (V400-T5), denominada agora, como pozolana do resíduo da nefelina sienito (PRNS). De modo a comparar a finura dos cimentos utilizados (CP II-F-32 e CP V) e da pozolana desenvolvida (PRNS), a Figura 31 apresenta as curvas das distribuições dos tamanhos de partículas, por granulometria a laser, para estes materiais.

Figura 31 – Curvas de distribuição do tamanho de partículas dos cimentos utilizados e da PRNS desenvolvida.



Fonte: Autor (2024).

Verifica-se que a metodologia adotada para a moagem e desenvolvimento da PRNS foi adequada, em termos de cominuição, pois produziu um material

aproximadamente três vezes mais fino que o cimento CP II-F-32 e duas vezes mais fino do que o CP V. Esses cimentos apresentaram, para o CP II-F-32 e para o CP V, respectivamente, os valores de 48,23 e 27,32  $\mu\text{m}$  para D90 e de 17,54 e 10,84  $\mu\text{m}$  para D50. A PRNS, por sua vez, apresentou os valores de 15,73 e 5,94  $\mu\text{m}$  para D90 e D50, respectivamente.

De acordo com Mirzahosseini e Riding (2015), a reatividade de um material pode ser aumentada com o processo de cominuição ao reduzir o tamanho de partícula, tendo maior índice de atividade e consumo de portlandita entre 0 e 25  $\mu\text{m}$ , médio índice entre 25 e 38  $\mu\text{m}$  e baixo índice entre 63 e 75  $\mu\text{m}$ . Devido ao aumento da área de superfície das partículas, materiais menores que 5  $\mu\text{m}$  podem alcançar considerável reatividade mesmo em materiais siliciosos, que são considerados sem reatividade de hidratação (MITROVIC; ZDUJIC, 2014).

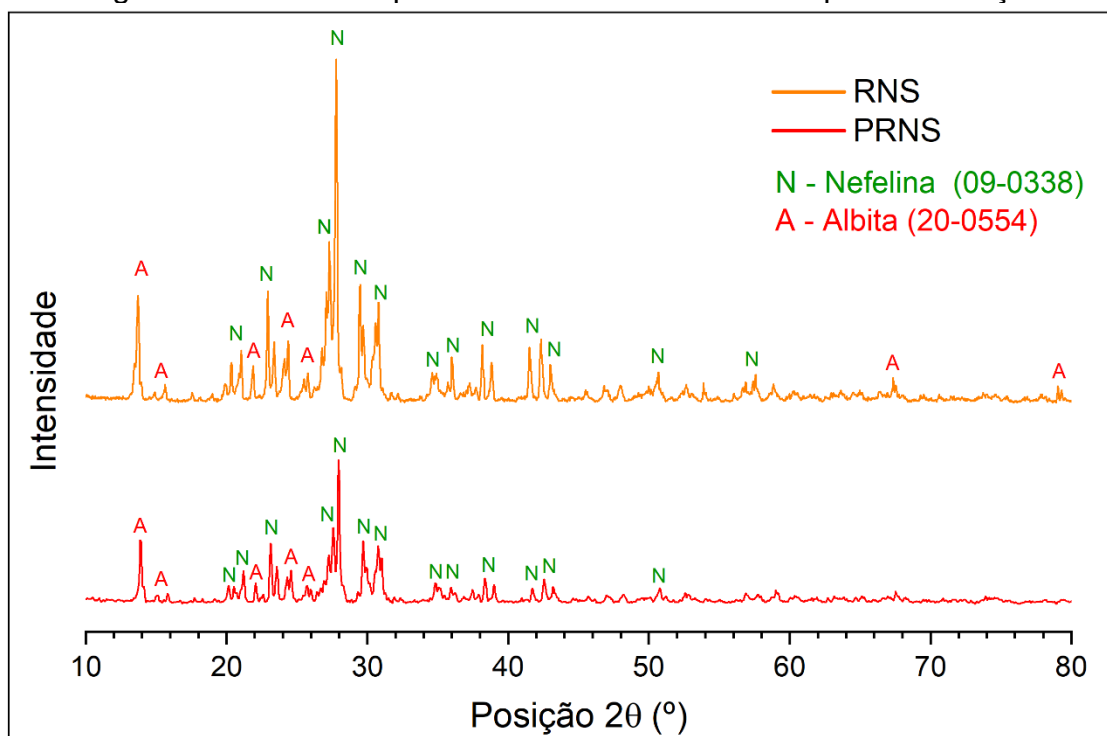
Para avaliar a potencialidade da PRNS como material cimentício suplementar e a sua pozolanicidade, dois métodos foram utilizados nesta pesquisa. Pelo método utilizando cal hidratada, a relação a/c necessária foi de 0,62, obtendo uma consistência de 228 mm e o valor médio obtido para a resistência à compressão da PRNS foi de, aproximadamente, 3,1 MPa. Segundo a NBR 5751 (ABNT, 2015), a resistência mínima deve ser de 6,0 MPa para considerar o material como pozolânico e, desta forma, a PRNS foi classificada como material não pozolânico.

No entanto, este mesmo material pelo método utilizando cimento Portland, apresentou uma relação de desempenho mecânico à compressão de 93%, quando comparado com a dosagem de referência, que utiliza somente cimento Portland. De acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014), materiais que apresentam uma relação igual ou superior a 90% podem ser classificados como pozolânicos e, portanto, a PRNS poderia ser considerada, por este método, como material pozolânico.

Percebe-se uma controvérsia entre as classificações obtidas para a PRNS pelas duas normas. Acredita-se que o método utilizando cal hidratada considera apenas a capacidade dos materiais pozolânicos reagirem com o hidróxido de cálcio para formarem compostos com propriedades cimentícias, similares aos desenvolvidos pelo cimento. Já o método utilizando cimento, considera também o efeito fíler, capaz de contribuir com efeitos físicos e químicos, modificando a distribuição e o tamanho dos poros, diminuindo a porosidade total, aumentando a densidade de empacotamento e agindo como pontos de nucleação heterogênea (HAWKINS; TENNIS; DETWILER, 2005; PANESAR; ZHANG, 2020).

Desta forma, mesmo que a PRNS não seja um material pozolânico, sua utilização como material cimentício suplementar ainda pode ser viável. Dando continuidade à investigação científica, conduziu-se análise pela técnica de DRX de modo a verificar se a cominuição do RNS, para desenvolvimento da PRNS, modificou a estrutura cristalina do resíduo. A Figura 32 apresenta os resultados obtidos para o DRX dos materiais RNS e da PRNS.

Figura 32 – DRX comparativo do RNS e da PRNS após cominuição.



Fonte: Autor (2024).

Observa-se que os materiais RNS e PRNS exibem picos nítidos, estreitos e bem definidos, estabelecidos em posições específicas. Desta forma, após a cominuição do RNS para o desenvolvimento da PRNS, não foi identificada alteração na composição mineralógica ou na estrutura cristalina do resíduo. Assim, a moagem de alta energia utilizada não foi capaz de ocasionar um predomínio da fase amorfa.

No entanto, houveram reduções das intensidades dos picos, o que sugere alterações na cristalinidade do material. A moagem pode ter ocasionado perda da orientação cristalina ou defeitos estruturais, levando a uma diminuição na intensidade dos picos. Resultados similares foram observados por Mucsi *et al.* (2021), onde a moagem não ocasionou o amorfismo da amostra.

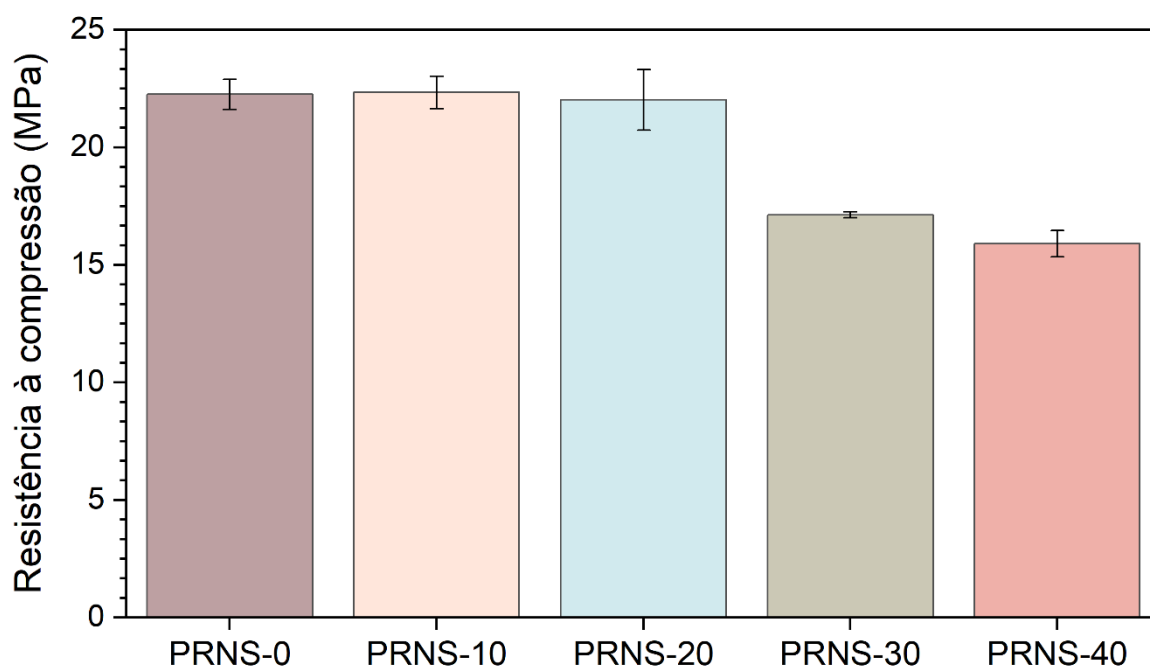
Em virtude da relação *a/c* ser mantida fixa e igual a 0,48, conforme recomendações da NBR 5752 (ABNT, 2014), todas as argamassas apresentaram

aspecto seco, com pouca fluidez e alta viscosidade, sem que ocorresse adensamento e espalhamento adequado na mesa de fluxo, não sendo possível realizar a medição do índice de consistência das argamassas utilizadas para avaliar a pozolanicidade.

Estes resultados estão de acordo com a literatura que, segundo Gurevich, Kalinkina e Kalinkin (2020), o uso do resíduo da nefelina como MCS em substituição parcial ao cimento requer um consumo alto de aditivos plastificantes e de água para o desenvolvimento de matrizes cimentícias, como argamassas e concretos.

Os resultados dos valores médios para a resistência à compressão das argamassas, com os diferentes teores de substituição do cimento por PRNS, são apresentados na Figura 33. Nota-se que os teores de substituição de 10 e 20% produziram resultados similares ao material de referência. No entanto, teores de 30% ou mais acarretam em redução da resistência à compressão das argamassas.

Figura 33 – Resistência à compressão das argamassas utilizando a PRNS.



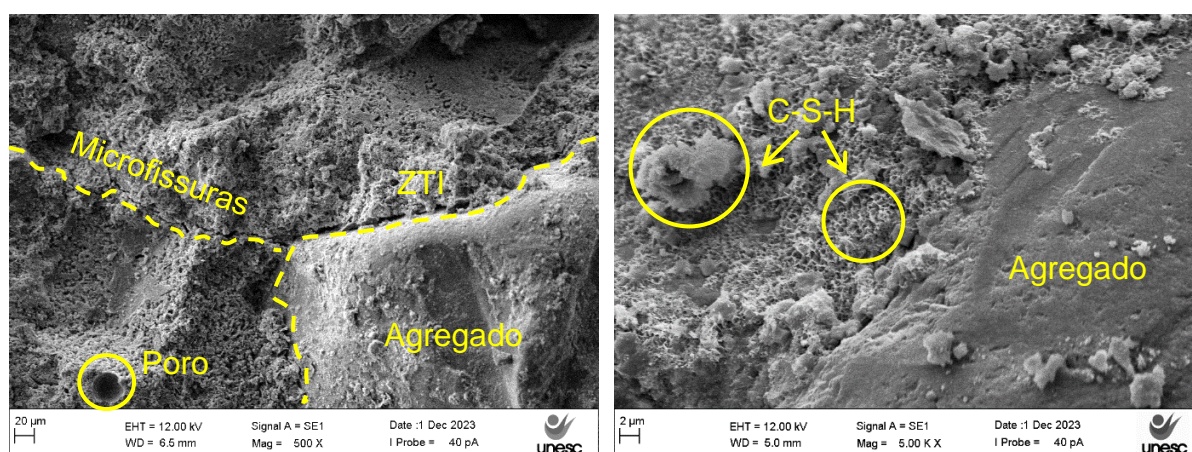
Fonte: Autor (2024).

A predominância da fase cristalina, identificada no material PRNS, pode ser o motivo da redução do desempenho mecânico à compressão observado para as dosagens PRNS-30 e PRNS-40. No entanto, o material desenvolvido pode ter agido como fíler, fornecendo pontos de nucleação, modificando a estrutura de empacotamento do sistema (PANESAR; ZHANG, 2020), contribuindo para a manutenção da resistência mecânica observado nas dosagens PRNS-10 e PRNS-20.

Com base nos resultados, a dosagem PRNS-20 é a mais promissora e pode ser uma alternativa viável para as argamassas e concretos, substituindo parcialmente o cimento de forma adequada. Assim, o uso da PRNS poderá contribuir para a redução dos custos de insumos, da demanda por minerais naturais, dos impactos ambientais associados à exploração dos recursos e da produção do clínquer.

Para analisar as possíveis alterações morfológicas na superfície das matrizes cimentícias, devido à utilização do MCS, uma argamassa contendo 40% de PRNS em substituição ao cimento foi preparada e analisada por MEV, cujas as imagens são apresentadas na Figura 34.

Figura 34 – Imagens da microscopia da argamassa utilizando a PRNS.



(a) Dosagem A0<sub>40%</sub> (500x)

(b) Dosagem A0<sub>40%</sub> (5.000x)

Fonte: Autor (2024).

Para a argamassa A0<sub>40%</sub>, foi identificada uma morfologia da superfície caracterizada por uma matriz homogênea e densa, de baixa porosidade, devido ao preenchimento pelos produtos de hidratação, sendo possível identificar a ZTI do AMN com a matriz na Figura 34(a). Já na Figura 34(b) é possível identificar a fase hidratada do C-S-H nas formas de flocos gelatinosos e pequenos cristais fibrosos.

Além disso, de acordo com Soltaninejad *et al.* (2021), resíduos sólidos utilizados como MCS tendem a desenvolver após 28 dias, C-S-H secundário, CH e principalmente etringita, contribuindo para uma microestrutura mais compacta. Quando a microestrutura se torna mais compacta, há um incremento na resistência mecânica, pois o espaço anteriormente poroso entre as partículas inertes, são preenchidos por redes de cristalitos de etringita (NGUYEN *et al.*, 2021).

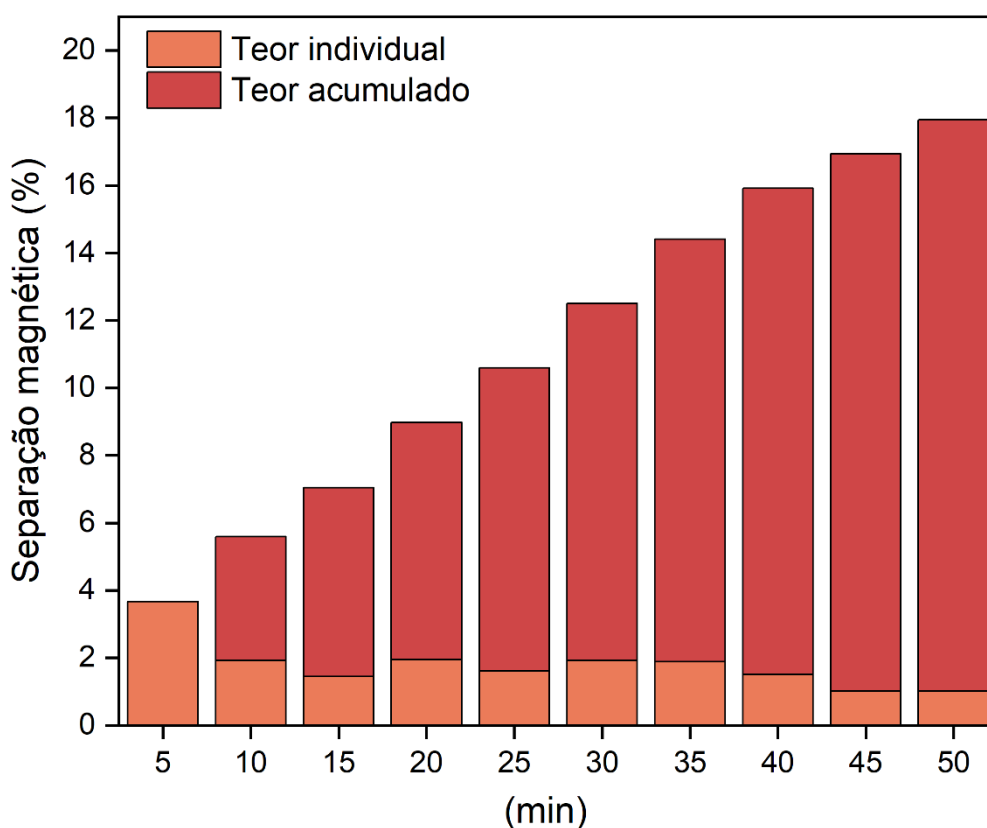
#### 5.4.4 Análise da segregação da fração ferrosa do RNS

No processo de segregação da fração magnética do RNS, o método de separação por via seca, utilizando um ímã permanente de 1.500 Gauss, apresentou resultado ineficaz, pois a amostra não foi atraída pelo campo gerado. De fato, uma densidade de fluxo magnético de 1.500 Gauss pode ser considerado com baixa força de atração, sendo capazes de atrair somente materiais fortemente magnéticos.

A eficácia da segregação depende do campo gerado, bem como dos minerais presentes, de sua quantidade e localização na partícula. Por vezes, a cominuição do material facilita ou permite que os minerais portadores de ferro sejam obtidos. Alguns modelos de separadores magnéticos utilizados em plantas industriais são de alta intensidade, de 8.000 até 15.000 Gauss (JENA *et al.*, 2014; VOLKMANN, 2004).

Como o RNS já passou por processos de separação magnética, essa técnica confirmou a necessidade da utilização de campos magnéticos superiores ou novos processos de separação. Sendo assim, foi utilizado o método por via úmida com um ímã de 10.000 Gauss, estando os resultados para os teores individuais e acumulados de cada separação apresentados na Figura 35.

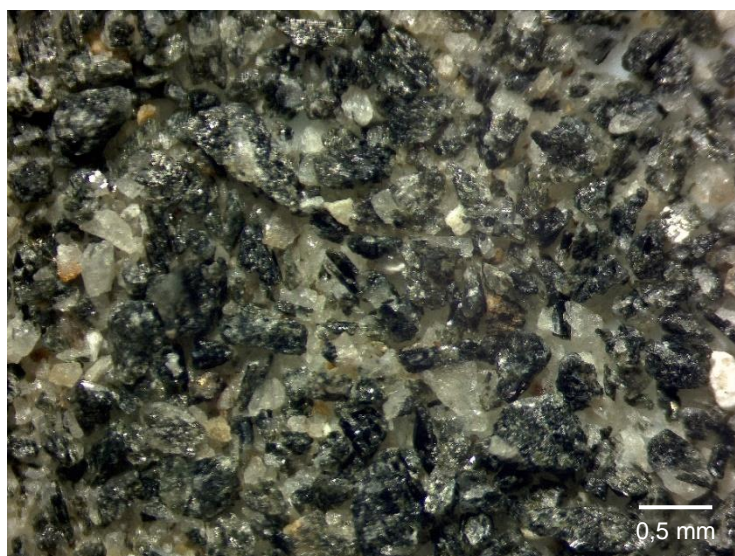
Figura 35 – Teores de separação magnética a úmido do RNS.



Fonte: Autor (2024).

Constata-se que este método foi capaz de segregar uma parcela da amostra, em cada um dos dez procedimentos realizados, obtendo frações magnéticas do RNS. O maior teor de segregação foi obtido no primeiro procedimento, com aproximadamente 3,7%. Os sete procedimentos subsequentes oscilaram variando de 1,5 até 1,9% e, por fim, os dois últimos com valores de, aproximadamente, 1,0%. O teor final obtido para a separação magnética acumulada foi de, aproximadamente, 18% nos dez procedimentos. A Figura 36 ilustra uma das frações obtidas pela separação magnética à úmido do RNS com o campo de alta intensidade, onde observa-se uma predominância de minerais máficos, de coloração escura e brilho vítreo nas clivagens e faces cristalinas.

Figura 36 – Imagem da fração do RNS obtido por separação magnética a úmido.



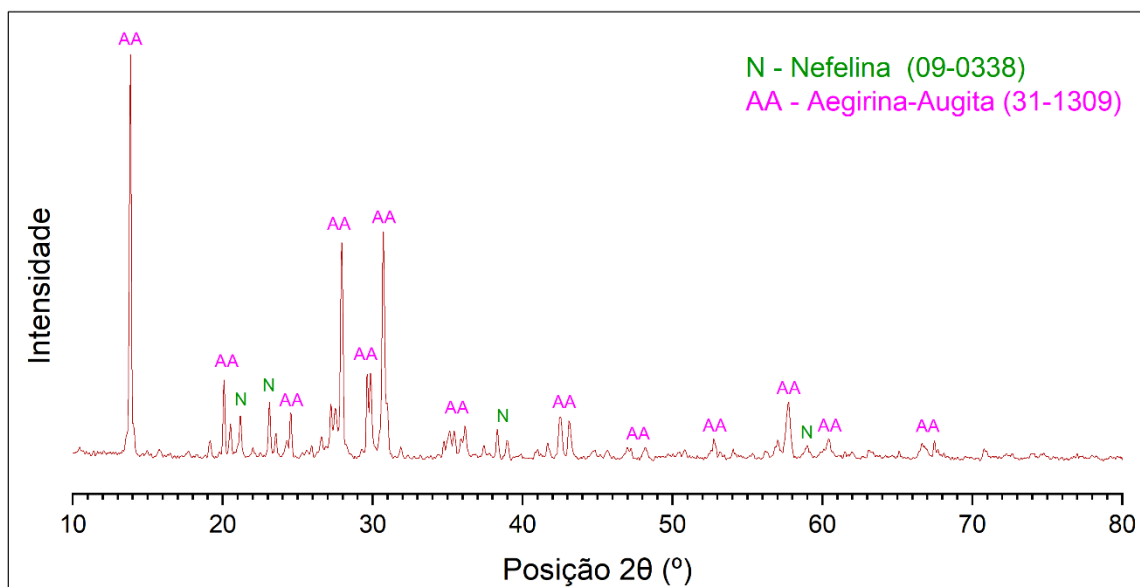
Fonte: Autor (2024).

De acordo com Winter (2014), os sienitos podem ter em sua composição teores entre 10 e 35% de minerais máficos, sendo os mais frequentes os piroxênios e a biotita. As concentrações elevadas de minerais ricos em ferro e magnésio tornam a coloração dos minerais mais escura. Assim, o processamento adotado para a separação magnética intensificou a presença destes minerais máficos e portadores de óxido de ferro encontrados no RNS.

Uma amostra do material obtido por separação magnética foi conduzida para análise por DRX, para determinação da composição mineralógica. O resultado, apresentado na Figura 37, indicou que esta fração segregada é composta por minerais como a nefelina e pelos piroxênios aegirina-augita. A nomenclatura aegirina-augita  $((Ca,Na)(Mg,Fe^{2+},Fe^{3+})Si_2O_6)$  é frequentemente abordada desta maneira por

apresentar uma composição intermediária entre a aegirina ( $\text{NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$ ) e a augita ( $(\text{CaMgFe}^{2+})\text{Si}_2\text{O}_6$ ), sendo pertencente ao grupo dos piroxênios e do subgrupo dos clinopiroxênios (MORIMOTO *et al.*, 1988).

Figura 37 – DRX da fração do RNS obtida por separação magnética à úmido.



Fonte: Autor (2024).

Os piroxênios são considerados minerais paramagnéticos, em que surge uma magnetização momentânea e induzida quando um campo magnético é aplicado nesses materiais, sendo a sua susceptibilidade reversível. Isso ocorre porque os elétrons que estavam desemparelhados, alinham-se quando o campo magnético é aplicado, sendo então atraídos fracamente pelo campo magnético (ARCHANJO, 2003). Assim, o aumento no campo magnético, devido à utilização de um ímã com densidade de fluxo de 10.000 Gauss, combinado com a rota úmida, intensificou a atração das partículas paramagnéticas presentes no RNS, identificadas pelos minerais aegirina-augita.

Os minerais aegirina-augita costumam formar associações com outros minerais como feldspatos (albita e microclina) e feldspatóides (nefelina), em rochas tipicamente alcalinas e ígneas (SANTOS, 2016). Esses resultados estão de acordo com os obtidos nesta pesquisa, para as análises por DRX realizadas para a NS e para o RNS (que identificaram como principais minerais a albita, a microclina e a nefelina), da análise visual com identificação da presença de minerais máficos, como também da difícil segregação por separação magnética necessitando de campos de alta intensidade.

Alguns minerais portadores de ferro, como a magnetita, possuem elevado valor econômico e mercado consolidado. O óxido de ferro, de valor comercial, também pode ser obtido a partir da NS (na primeira etapa de separação magnética), sendo classificada como um subproduto de seu beneficiamento. Entretanto, os minerais aegirina-augita não possuem um mercado consumidor bem estabelecido e podem ter baixo valor econômico. Assim, o processo de beneficiamento estabelecido, utilizando uma rota via úmida com campo magnético de 10.000 Gauss, embora eficaz para a segregação da fração magnética, não se mostra promissor em termos econômicos.

#### **5.4.5 Análise da segregação da fração potássica do RNS**

Em razão do teor de potássio identificado no RNS, o tratamento térmico com cloreto de cálcio seguido de lixiviação em água, foi investigado para a segregação da fração potássica presente no resíduo. Os teores de óxido de potássio contido no RNS, antes e depois do tratamento, foram comparados obtendo um teor de segregação de, aproximadamente, 93% de potássio na forma de KCl (silvita). O cloreto de cálcio tem sido a forma mais comum para a sua comercialização no setor agrícola (IBRAM, 2021b). Resultados similares, utilizando tratamento térmico com cloreto de cálcio, foram encontrados na literatura que obtiveram teores de potássio acima de 90% (HASELI *et al.*, 2019; JENA *et al.*, 2014; MAZUMDER; SHARMA; RAO, 1993).

Outros processamentos já foram investigados, mas alcançaram menores teores de segregação. Segundo Jena *et al.* (2014), a obtenção do K<sub>2</sub>O contido na nefelina sienito também pode ser obtida por técnicas de beneficiamento físicas, como a separação magnética de alta intensidade (15.000 Gauss) e a flotação. No entanto, estas técnicas são pouco eficientes, 21 e 27%, respectivamente.

A extração do K<sub>2</sub>O pelo método de lixiviação, com os ácidos sulfúrico ou clorídrico, também é possível e apresenta resultados similares com ambos os ácidos, obtendo uma segregação de até 50% dependendo de parâmetros, como o tipo de moinho e tempo de moagem empregados (JENA *et al.*, 2014).

Lu *et al.* (2018) avaliaram a extração do potássio de um minério de feldspato potássico com sulfato de cálcio, variando a proporção destes elementos e também das temperaturas e tempos de tratamento térmico, seguido de lixiviação. Os melhores resultados foram obtidos para uma proporção em massa de 1:3, com uma temperatura de 1200 °C por 2 h, obtendo cerca de 62% na forma de K<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.

De acordo com Samantray *et al.* (2022), depois do nitrogênio e do fósforo, o potássio é o macronutriente mais importante para o desenvolvimento das plantas. Como os principais depósitos estão situados no hemisfério norte, minerais como os feldspatos e feldspatóides, contendo entre 5 e 15% de  $K_2O$ , tem sido utilizados como alternativas. Com isso, o RNS passa a ser uma fonte potencial deste elemento.

A nefelina sienito apresenta teores de  $K_2O$  que variam entre 5 e 13% (SAMANTRAY *et al.*; 2022). A NS e o RNS apresentaram um teor de  $K_2O$  de, aproximadamente, 8 e 5%, respectivamente, demonstrando que grande parte do potássio ainda permanece no resíduo e com uma concentração economicamente viável para o seu beneficiamento. Teores similares foram identificados para o resíduo da nefelina por Jiang *et al.* (2023) de, aproximadamente, 4,5% de  $K_2O$ .

Para tornar o processo de segregação da fração potássica por tratamento térmico ainda mais atrativo economicamente, deve-se explorar mais o material resultante, avaliando a contribuição de outros elementos lixiviados na solução e que podem agir como remineralizadores do solo para uso na agricultura. A segregação de novos elementos metálicos presentes no resíduo e de interesse comercial, como o sódio, também pode ser explorada. Outra alternativa, ainda, seria a destinação da fração sólida resultante para uso como material cimentício suplementar, pois além de conter os elementos silício, alumínio e cálcio, adequados ao uso como MCS (BAGANI *et al.*, 2021), apresentam elevada finura e estrutura possivelmente amorfa.

Neste cenário, a técnica investigada de tratamento térmico com  $CaCl$  seguido de lixiviação em água, para a obtenção do  $K_2O$  presente no RNS é altamente eficaz e possui um mercado promissor, tornando o resíduo uma fonte de insumo mineral, promovendo sua valorização e tendo como potencial aplicação o setor agrícola.

## 6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÃO

Com base na metodologia e nos resultados obtidos, considera-se com êxito a valorização do resíduo da nefelina sienito como insumo mineral para a construção civil, como agregado miúdo e material cimentício suplementar, e para a agricultura, pela extração do potássio na forma de cloreto de potássio, contribuindo para a circularidade do fluxo de insumos minerais na economia.

Foi possível avaliar parâmetros físicos do RNS que apresentou módulo de finura de 2,23 e curva de distribuição de partículas uniforme; teor de material fino de 2,75%; massa específica de 2,49 g/cm<sup>3</sup>; massa unitária de 1,34 g/cm<sup>3</sup> e absorção de água de 0,70%. As análises química e morfológica revelaram que o RNS é composto majoritariamente por sílica (56%), alumina (20%) e álcalis totais (15%), com estrutura cristalina e tendo como principais minerais a nefelina, a albita e a aegirina-augita; apresentando partículas alongadas, achatadas e angulares. Estes resultados indicam a viabilidade técnica do RNS como agregado miúdo para uso em matrizes cimentícias.

A avaliação do processamento para ativação mecânico-química do RNS indicou que a velocidade de rotação de 400 rpm por 5 min (V400-T5) se apresentou como a mais adequada para o desenvolvimento de um material cimentício suplementar, com 90% das partículas inferiores a 16 µm. A investigação da pozolanicidade revelou que este material desenvolvido não é pozolânico e mantém sua estrutura cristalina. Contudo, devido a sua alta finura, é capaz de atuar como fíler, contribuindo para manter a resistência à compressão em matrizes cimentícias até 20% de substituição ao cimento, indicando sua viabilidade técnica para uso parcial.

O uso do RNS como agregado miúdo afeta as propriedades das argamassas e concretos, tanto no estado fresco como no estado endurecido, aumentando o teor de ar, reduzindo a densidade, a trabalhabilidade e a resistência à compressão. A utilização integral do ARNS reduz aproximadamente 50% da resistência à compressão das argamassas e concretos. Porém, para as dosagens parciais em até 50%, as reduções de desempenho mecânico foram de 30% para as argamassas e até 15% para os concretos, indicando a possibilidade de aplicação na construção civil.

Na avaliação da durabilidade em Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, as argamassas desenvolvidas com o AMN e com o ARNS, até os 60 dias de cura, apresentaram expansibilidades similares.

Todavia, após 90 dias houve uma rápida deterioração, devido ao maior teor de alumina no resíduo e a possível presença de maior porosidade, intensificando a formação de etringita e favorecendo o surgimento e continuidade das patologias.

Para a segregação da fração ferrosa do RNS verificou-se que a rota úmida com um ímã de 10.000 Gauss segregou cerca de 20% do material, composta por nefelina e aegirina-augita. Quanto à segregação da fração potássica, o processo com tratamento térmico usando cloreto de cálcio conseguiu segregar 93% de  $K_2O$  na forma de KCl, com valor comercial estabelecido para aplicação como nutriente agrícola.

Acredita-se, diante dos resultados obtidos, que este estudo contribuiu para a valorização do resíduo da nefelina sienito, explorando suas potencialidades e diferentes aplicabilidades, fornecendo perspectivas para desenvolver rotas de beneficiamento, incluindo seu uso como agregado miúdo, como material cimentício suplementar e para a segregação das frações ferrosas e potássicas. Além disso, a valorização do resíduo da nefelina sienito pode promover uma simbiose industrial entre os setores de mineração, construção civil e agricultura, impulsionando a circularidade de insumos minerais e a economia circular.

## 6.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

- a) Analisar teores de lixiviação e solubilização do RNS, de modo a complementar sua classificação ambiental e reduzir possíveis impactos ambientais.
- b) Avaliar novos teores de utilização do ARNS em matrizes cimentícias, de modo a maximizar o uso do resíduo e potencializar as propriedades de interesse;
- c) Verificar a utilização de aditivos plastificantes para as argamassas com o ARNS, de modo a reduzir a necessidade de aumentar a relação a/c e melhorar as propriedades desejadas;
- d) Estudar a redução da relação a/c nos concretos C2 e também novas dosagens para resistências à compressão mais elevadas, afim de ampliar sua aplicação;
- e) Analisar o uso do KCl em plantas e suas vantagens como agente remineralizador de solos e fertilizante natural;
- f) Avaliar a fração não potássica, desenvolvida no tratamento térmico, como MCS em matrizes cimentícias na construção civil.
- g) Realizar análise do ciclo de vida do resíduo da nefelina sienito para identificar impactos ambientais e oportunidades de desenvolver produtos sustentáveis.

### 6.3 VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA TESE

Esta tese avaliou e desenvolveu estratégias e procedimentos para promover a valorização do resíduo da nefelina sienito, acreditando que todo resíduo, por meio de uma rota de beneficiamento adequada, pode ser valorizado, de forma a contribuir para a redução de impactos ambientais e auxílio para o avanço na economia circular.

O processo investigativo para o desenvolvimento de uma pesquisa científica, como uma tese de doutorado, ocasiona, de forma intrínseca, na geração de resíduos. Eles podem ser provenientes dos diversos testes preliminares para ajustes composicionais, da necessidade para análise nas propriedades no estado fresco ou dos corpos de prova utilizados para análises das propriedades no estado endurecido, especialmente para matrizes cimentícias.

Desta forma, buscou-se que todos os materiais gerados durante o desenvolvimento da tese, como os volumes excedentes necessários para garantir a execução dos ensaios e moldagem dos corpos de prova (sobras), fossem reaproveitados. A Figura 38 representa as argamassas e concretos descartados no processo investigativo, valorizados para o desenvolvimento de pavers (subprodutos).

Figura 38 – Valorização dos resíduos da tese e desenvolvimento de subprodutos.



a) Material a ser descartado

b) Desenvolvimento de subprodutos

Fonte: Autor (2024).

Quantitativamente, esta tese gerou, aproximadamente, 400 kg de argamassas e concretos no estado fresco, que foram reaproveitados para a moldagem de, aproximadamente, 200 pavers utilizados na pavimentação de áreas de acesso no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), campus Criciúma.

Além disso, todos os corpos de prova de argamassa e concretos foram cominuídos por um britador de mandíbula para o desenvolvimento de insumos minerais, agregados miúdos e graúdos, conhecidos como resíduos de construção civil (RCD) cinzas, por conter somente materiais cimentícios. A Figura 39 ilustra os resíduos gerados (corpos de prova) e os insumos minerais desenvolvidos.

Figura 39 – Valorização dos resíduos da tese como insumos minerais.



a) Resíduos sólidos gerados

b) Insumos minerais

Fonte: Autor (2024).

A quantidade de resíduos sólidos gerados durante esta tese foi de, aproximadamente, 670 kg sendo convertidos como insumos minerais a serem, posteriormente, utilizados para o desenvolvimento de novas pesquisas científicas.

Por fim, espera-se que essas ações, embora demandem um tempo e trabalho excedente considerável, possam servir de exemplo e inspiração para outros pesquisadores, contribuindo para o avanço na circularidade também dentro das instituições de ensino e pesquisa.

## REFERÊNCIAS

ABOUZEID, A.-Z.; NEGM, A.-T. Characterization and Beneficiation of an Egyptian Nepheline Syenite Ore. *Int. J. Miner.*, 2014, p. 1-9. DOI [10.1155/2014/128246](https://doi.org/10.1155/2014/128246).

ACORDI, J.; SIMÃO, L.; FARACO, M. N. S.; BORGERT, C. H.; OLIVO, E.; MONTEDO, O. R. K.; RAUPP-PEREIRA, F. Waste valorization of coal mining waste from a circular economy perspective: A Brazilian case study based on environmental and physicochemical features. *Resour. Pol.*, 2023, v. 80, p. 103243. DOI [10.1016/j.resourpol.2022.103243](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103243).

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Anuário Mineral Estadual – Santa Catarina**. Brasília: ANM, 2019, 57 p. Anos base 2017 e 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral>. Acesso em: 14 mar. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Produção Mineral – Anuário Mineral Brasileiro Interativo (AMN Interativo)**, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/producao-mineral>. Acesso em: 04 jan. 2023.

AGRIZZI, C. P.; CARVALHO, E. A. S.; GADIOLI, M. C. B.; BARRETO, G. N. S.; AZEVEDO, A. R. G.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Comparison between Synthetic and Biodegradable Polymer Matrices on the Development of Quartzite Waste-Based Artificial Stone. *Sustainability*, 2022, v. 14(1), p. 6388. DOI [10.3390/su14116388](https://doi.org/10.3390/su14116388).

AÏTCIN, P. C.; FLATT, J. R. **Science and Technology of Concrete admixtures**. Cambridge, Woodhead Publishing, 2016. DOI [10.1016/C2015-0-00150-2](https://doi.org/10.1016/C2015-0-00150-2).

AKINYEMI, B. A.; ALABA, P. A.; RASHEDI, A. Selected performance of alkali-activated mine tailings as cementitious composites: A review. *J. Build. Eng.*, 2022, v. 50, p. 104154. DOI [10.1016/j.jobbe.2022.104154](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104154).

ALELUIA, J.; FERRÃO, P. Assessing the costs of municipal solid waste treatment technologies in developing Asian countries. *Waste Manage.*, 2017, v. 69, p. 592–608. DOI [10.1016/j.wasman.2017.08.047](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.047).

ALMADA, B. S.; MELO, L. S.; DUTRA, J. B.; BUBANI, L. C.; SILVA, G. J. B.; SANTOS, W. J.; AGUILAR, M. T. P. Influence of the heterogeneity of waste from wet processing of ornamental stones on the performance of Portland cement composites. *Const. Build. Mat.*, 2020, v. 262, p. 120036. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2020.120036](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120036).

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO (ANEPAC). 2023. **Mercado**. Disponível em: <https://anepac.org.br/mercado/>. Acesso em 15 dez. 2023.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO (ANEPAC). 2012. **Mercado de Agregados no Brasil**. Disponível em: <https://anepac.org.br/agregados-para-construcao/>. Acesso em: 21 fev. 2021.

AO, W.; FU, J.; MAO, X.; KANG, Q.; RAN, C.; LIU, Y.; ZHANG, H.; GAO, Z.; LI, J.; LIU, G.; DAI, J. Microwave assisted preparation of activated carbon from biomass: A review. **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 2018, v. 92, p. 958-979. DOI [10.1016/j.rser.2018.04.051](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.051).

ARCHANJO, C. J. **Anisotropia de suscetibilidade magnética aplicada às rochas ígneas máficas intrusivas**. 2003. Tese (Doutorado em Livre Docência). Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo. DOI [10.11606/T.44.2013.tde-09052013-115138](https://doi.org/10.11606/T.44.2013.tde-09052013-115138).

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

\_\_\_\_\_. **NBR 5752**. Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro. ABNT, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro. ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. ABNT, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 6467**. Agregados – Determinação do inchamento do agregado miúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro. ABNT, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**. Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro. ABNT, 2022.

\_\_\_\_\_. **NBR 7214**. Areia norma para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro. ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. ABNT, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 9833**. Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro. ABNT, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro. ABNT, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653**. Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro. ABNT, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. **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, 2005.

\_\_\_\_\_. **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, 2005.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 13583**. Cimento Portland – Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro. ABNT, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 15261**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro. ABNT, 2005.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 16889**. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco cone. Rio de Janeiro. ABNT, 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 16915**. Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 16916**. Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 16917**. Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 16972**. Agregado – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 16973**. Agregado – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 17054**. Agregados - Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BAGANI, M.; BALOMENOS, E.; PANIAS, D. Nepheline syenite as an alternative source for aluminum production. **Minerals**, 2021, v. 11, p. 734. DOI [10.3390/min11070734](https://doi.org/10.3390/min11070734).

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019, 2 volumes.

BAKKEN, A. K.; GAUTNEB, H.; MYHR, K. Plant available potassium in rocks and mine tailings with biotite, nepheline and K-feldspar as K-bearing minerals. **Acta Agric. Scand. Sect. B Soil Plant Sci.**, 1997, v. 47, p. 129-134. DOI <https://doi.org/10.1080/09064719709362452>.

BEYGI, M. H. A.; KAMEZI, M. T.; AMIRI, J. V.; NIKBIN, I. M.; RABBANIFAR, S.; RAHMANI, E. Evaluation of the effect of maximum aggregate size on fracture behavior of self compacting concrete. **Constr. Build. Mater.**, 2014, v. 55, p. 202-211. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2014.01.065](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.065).

BOGGIO, A. J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/12575>. Acesso em: 18 abr. 2020.

BURAT, F.; KANGAL, O.; ONAL, G. An alternative mineral in the glass and ceramic industry: Nepheline syenite. **Miner. Eng.**, 2006, v. 19, p. 370-371. DOI [10.1016/j.mineng.2005.10.015](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.10.015).

CANEDA-MARTÍNEZ, L.; FRÍAS, M.; MEDINA, C.; ROJAS, M. I. S.; REBOLLEDO, N.; SÁNCHEZ, J. Evaluation of chloride transport in blended cement mortars containing coal mining waste. **Constr. Build. Mater.**, 2018, v. 190, p. 200-210. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2018.09.158](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.158).

CAO, Z.; CAO, Y.; DONG, H.; ZHANG, J.; SUN, C. Effect of calcination condition on the microstructure and pozzolanic activity of calcined coal gangue. **Int. J. Miner. Process.**, 2016, v. 146, p. 23–28. DOI [10.1016/j.minpro.2015.11.008](https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.11.008).

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo de ligação**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica - Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000746845>. Acesso em 14 nov. 2020.

CARASEK, H. Argamassas. 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.

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. 1, São Paulo: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2017.

CARVALHO, F. A.; NOBRE, J. N. P.; CAMBRAIA, R. P.; SILVA, A. C.; FABRIS, J. D.; REIS, A. B.; PRAT, B. V. Quartz Mining Waste for Concrete Production: Environment and Public Health. **Sustainability**, 2022, v. 14, p. 389. DOI [10.3390/su14010389](https://doi.org/10.3390/su14010389).

CAPASSO, I.; LIRER, S.; FLORA, A.; FERONE, C.; CIOFFI, R.; CAPUTO, D.; LIGUORI, B. Reuse of mining waste as aggregates in fly ash-based geopolymers. **J. Clean. Prod.**, 2019, v. 220, p. 65-73. DOI [10.1016/j.jclepro.2019.02.164](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.164).

CARNEIRO, A.; CINCOTTO, M. **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas**. Boletim Técnico, PCC, nº 237, 18 f. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Disponível em: [https://pme.webhostusp.sti.usp.br/?page\\_id=109](https://pme.webhostusp.sti.usp.br/?page_id=109). Acesso em 07 mai. 2020.

CHIWONA, A. G.; CORTÉS, J. A.; GAULTON, R. G.; MANNING, D. A. C. Petrology and geochemistry of selected nepheline syenites from Malawi and their potential as alternative potash sources. **J. Afr. Earth Sci.**, 2020, v. 164, p. 103769. DOI [10.1016/j.jafrearsci.2020.103769](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103769).

CONG, X.; LU, S.; GAO, Y.; YAO, Y.; ELCHALAKANI, M.; SHI, X. Effects of microwave, thermomechanical and chemical treatments of sewage sludge ash on its early-age behavior as supplementary cementitious material. **J. Clean. Prod.**, 2020, v. 258, p. 120647. DOI [10.1016/j.jclepro.2020.120647](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120647).

CRISTELO, N.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; CASTRO, F.; FERNANDES, L.; TAVARES, P. Sustainable alkaline activation of fly ash, aluminium anodising sludge and glass powder blends with a recycled alkaline cleaning solution. **Constr. Build. Mater.**, 2019, v. 204, p. 609-620. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2019.01.226](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.226).

CRUZ, C.M.; OLIVEIRA, D.C.; FAUSTINO, L.M.; ROVERI, C.D.; MAESTRELLI, S.C. Uso de nefelina como fonte alternativa de álcalis em porcelanatos: caracterização reológica e física. **Cerâmica**, 2018, v. 64, p. 230-235. DOI [10.1590/0366-69132018643702245](https://doi.org/10.1590/0366-69132018643702245).

DE JESUS, A.; MENDONÇA, S. Lost in transition? Drivers and barriers in the ecoinnovation road to the circular economy. **Ecol. Econ.**, 2018, v. 145, p. 75-89. DOI [10.1016/j.ecolecon.2017.08.001](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.08.001).

DE WIT, M.; HOOGZAAD, J.; RAMKUMAR, S.; FRIEDL, H.; DOUMA, A. The Circularity Gap Report - an analysis of the circular state of the global economy. **Circle Economy**, 2018. Disponível em: <https://shiftingparadigms.nl/wp-content/uploads/2017/11/the-circularity-gap-report-2018.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2021.

DEFÁVERI, K. C. S.; SANTOS, L. F.; CARVALHO, J. M. F.; PEIXOTO, R. A. F.; BRIGOLINI, G. J. Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: A study of mechanical and microstructural properties. **Constr. Build. Mater.**, 2019, v. 220, p. 375-385. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2019.05.181](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.181).

DUARTE, E.B.; NEVES, M.A.; DE OLIVEIRA, F.B.; MARTINS, M.E.; DE OLIVEIRA, C.H.R.; BURAK, D. L.; ORLANDO, M.T.D.; RANGEL, C.V.G.T. Trace metals in Rio Doce sediments before and after the collapse of the Fundão iron ore tailing dam, Southeastern Brazil. **Chemosphere**, 2021, v. 262, p. 127879. DOI [10.1016/j.chemosphere.2020.127879](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127879).

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Rules and Regulations**. Federal Register, 80 (8), 2015. US Federal Government. Disponível em: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2015-01-13/pdf/FR-2015-01-13.pdf>. Acesso em: 06 mai. 2022.

ESPOSITO, L.; SALEM, A.; TUCCI, A.; GUALTIERI, A.; JAZAYERI, S. H. The use of nepheline-syenite in a body mix for porcelain stoneware tiles. **Ceram. Int.**, 2005, v. 31, p. 233-240. DOI [10.1016/j.ceramint.2004.05.006](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2004.05.006).

FALAGÁN, C.; GRAIL, B.M.; JOHNSON, D.B. New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings. **Miner. Eng.**, 2017, v. 106, p. 71-78. DOI [10.1016/j.mineng.2016.10.008](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.10.008).

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

FELLNER, J.; LEDERER, J.; SCHARFF, C.; LANER, D. Present potentials and limitation of a circular economy with respect to primary raw material demand. **J. Ind. Ecol.**, 2017, v. 21(3), p. 494-496. DOI [10.1111/jiec.12582](https://doi.org/10.1111/jiec.12582).

FONTES, W. C.; MENDES, J. C.; DA SILVA, S. N.; PEIXOTO, R. A. F. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. **Constr. Build. Mater.**, 2016, v. 112, p. 988-995. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2016.03.027](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.027).

FRANCKLIN, I. JR.; RIBEIRO, R.P.; CORRÊA, F.A. Quartzite Mining Waste: Diagnosis of ASR Alkali-Silica Reaction in Mortars and Portland Cement Concrete. **Materials**, 2021, v. 14, p. 7642. DOI [10.3390/ma14247642](https://doi.org/10.3390/ma14247642).

GHAFOORI, N.; BATILOV, I.; NAJIMI, M. Resistance to Sulfate Attack of Mortars Containing Colloidal Nanosilica and Silica Fume. **J. Mater. Civ. Eng.**, 2020, v. 32. DOI [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003458](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003458).

GOLEWSKI, G. L. Assessing of water absorption on concrete composites containing fly ash up to 30% in regards to structures completely immersed in water. **Case Stud. Constr. Mater.**, 2023, v. 19, p. e02337. DOI [10.1016/j.cscm.2023.e02337](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02337).

GONZÁLES, J. S.; BOADELLA, I. L.; GAYARRE, F. L.; PÉREZ, C. L. C; LÓPEZ, M. S.; STOCHINO, F. Use of Mining Waste to Produce Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete. **Materials**, 2020, v. 13, p. 2457. DOI [10.3390/ma13112457](https://doi.org/10.3390/ma13112457).

GOVINDAN, K.; HASANAGIC, M. A systematic review on drivers, barriers, and practices towards circular economy: A supply chain perspective. **Int. J. Prod. Res.**, 2018, v. 56, p. 278-311. DOI [10.1080/00207543.2017.1402141](https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1402141).

GUILLET, R.G. Nepheline Syenite. In: **Industrial Minerals & Rocks – Commodities, Markets and Uses**. 6<sup>a</sup> ed., Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., Colorado, 1994, p. 711-730.

GUO, Y.; YAN, K.; CUI, L.; CHENG, F. Improved extraction of alumina from coal gangue by surface mechanically grinding modification. **Powder Technol.**, 2016, v. 302, p. 33-41. DOI [10.1016/j.powtec.2016.08.034](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.08.034).

GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. **Constr. Build. Mater.**, 2014, v.73, p. 562-574. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2014.09.102](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.102).

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

HAACH, V. G.; VASCONCELOS, G.; LOURENÇO, P. B. Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. **Constr. Build. Mater.**, 2011, v. 25, p. 2980-2987. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011).

HAAS, W.; KRAUSMANN, F.; WIEDENHOFER, D.; HEINZ, M. How circular is the global economy? An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European union and the world in 2005. **J. Ind. Ecol.**, 2015, v 19 (5), p. 765-777. DOI [10.1111/jiec.12244](https://doi.org/10.1111/jiec.12244).

HASELI, P.; MAJEWSKI, P.; CHRISTO, F. C.; HAMMOND, B.; BRUNO, F. Thermochemical and Experimental Kinetic Analysis of Potassium Extraction from Ultrapotassic Syenite Using Molten Chloride Salts. **Ind. Eng. Chem. Res.**, 2019, v. 58, p. 7397–7407. DOI [10.1021/acs.iecr.8b06328](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b06328).

HAWKINS, P; TENNIS, P. D.; DETWILER, R. J. **The Use of Limestone in Portland Cement: A State of the art review**. EB227, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2005, 44 p. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/333981852\\_The\\_Use\\_of\\_Limestone\\_in\\_Portland\\_Cement\\_A\\_State-of-the-Art\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/333981852_The_Use_of_Limestone_in_Portland_Cement_A_State-of-the-Art_Review). Acesso em: 21 jul. 2022.

HE, Z.; YANG, Y.; YUAN, Q.; SHI, J.; LIU, B.; LIANG, C.; DU, S. Recycling hazardous water treatment sludge in cement-based construction materials: Mechanical properties, drying shrinkage, and nano-scale characteristics. **J. Clean. Prod.**, 2021, v. 290, p. 125832. DOI [10.1016/j.jclepro.2021.125832](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125832).

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. R. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Brasília: PINI, 1992.

HELENE, P; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. 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.

HOMRICH, A. S.; GALVÃO, G.; ABADIA, L. G.; CARVALHO, M. M. The Circular Economy Umbrella: Trends and Gaps on Integrating Pathways. **J. Clean. Prod.**, 2017, v. 20, p. 525-543. DOI [10.1016/j.jclepro.2017.11.064](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.064).

IDIART, A.; BISSCHOP, J.; CABALLERO, A.; LURA, P. A numerical and experimental study of aggregate-induced shrinkage cracking in cementitious composites. **Cem. Concr. Res.**, 2012, v. 42, p. 272-281. DOI [10.1016/j.cemconres.2011.09.013](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.013).

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Setor Mineral 2021**. 2021a. 45 p. Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/>. Acesso em: 09 ago. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Plano Nacional de Fertilizantes 2050 – Uma estratégia para os fertilizantes no Brasil**. 2021b. 195 p. Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/>. Acesso em: 09 nov. 2022.

INTERBIO. **Selo verde Interbio – Menos aterro, mais reciclagem**. Disponível em: <https://www.interbio.com.br/selo-verde/>. Acesso em 23 de março de 2022.

ITAL – Indústria de Equipamentos Magnéticos. **Catálogo Completo**. Disponível em: <https://www.ital.com.br/catalogo>. Acesso em: 17 de março de 2022.

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, 3ª ed., 2 volumes. São Paulo: IBRACON, 2017.

JENA, S. K.; DHAWAN, N.; RAO, D.S.; MISRA, P. K.; MISHRA, B.K.; DAS, B. Studies on extraction of potassium values from nepheline syenite. **Int. J. Miner. Process.**, 2014, v. 133, p. 13–22. DOI [10.1016/j.minpro.2014.09.006](https://doi.org/10.1016/j.minpro.2014.09.006).

JIANG, Y.; LING, T-C.; MO, K. H.; SHI, C. A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products. **J. Environ. Manag.**, 2019, v. 242, p. 440-449. DOI [10.1016/j.jenvman.2019.04.098](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.098).

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 [10.1016/j.conbuildmat.2023.130458](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130458).

JUENGER, M.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. **Cem. Concr. Res.**, 2019, v. 122, p. 257-273. DOI [10.1016/j.cemconres.2019.05.008](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008).

KANNA, V.; OLSON, R. A.; JENNINGS, H. M. Effect of shrinkage and moisture content on the physical characteristics of blended cement mortars. **Cem. Concr. Res.**, 1998, v. 28, p. 1467-1477. DOI [10.1016/S0008-8846\(98\)00120-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00120-3).

KASU, S. R.; DEB, S.; MITRA, N.; MUPPIREDDY, A. R.; KUSAM, S. R. Influence of aggregate size on flexural fatigue response of concrete. **Constr. Build. Mater.**, 2019, v. 229, p. 116922. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2019.116922](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116922).

KAWABATA, Y.; DUNANT, C.; YAMADA, K.; SCRIVENER, K. Impact of temperature on expansive behavior of concrete with a highly reactive andesite due to the alkali-silica reaction. **Cem. Concr. Res.**, 2019, v. 125, p. 105888. DOI [10.1016/j.cemconres.2019.105888](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105888).

KHAN, M.M.U.H.; JAIN, S.; VAEZI, M.; KUMAR, A. Development of a decision model for the techno-economic assessment of municipal solid waste utilization pathways. **Waste Manage.**, 2016, v. 48, p. 548-564. DOI [10.1016/j.wasman.2015.10.016](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.016).

KINNUNEN, P.; ISMAILOV, A.; SOLISMAA, S.; SREENIVASAN, H.; RAISANEN, M.; LEVANEN, E.; ILLIKAINEN, M. Recycling mine tailings in chemically bonded ceramics e A review. **J. Clean. Prod.**, 2018, v. 174, p. 634-649. DOI [10.1016/j.jclepro.2017.10.280](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.280).

KIRCHHERR, J.; PISCICELLI, L.; BOURA, R.; KOSTENSE-SMIT, E; MULLER, J.; HUIBRECHTSE-TRUIJENS, A.; HEKKERT, M. Barriers to the circular economy: Evidence from the European union (EU). **Ecol. Econ.**, 2018, v. 150, p. 264-272. DOI [10.1016/j.ecolecon.2018.04.028](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.028).

KUMAR, S.; GUPTA, R. C.; SHRIVASTAVA, S. Effective utilisation of quartz sandstone mining wastes: A technical note on its thermal resistance. **J. Clean. Prod.**, 2017, v. 140, p. 1129-1135. DOI [10.1016/j.jclepro.2016.10.053](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.053).

KUSUMAWARDANI, D. M.; WONG, Y. D. The influence of aggregate shape properties on aggregate packing in porous asphalt mixture (PAM). **Constr. Build. Mater.**, 2020, v. 255, p. 119379. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2020.119379](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119379).

KRISTOFFERSEN, E.; BLOMSMA, F.; MIKALEF, P.; LI, J. The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies. **J. Bus. Res.**, 2020, v. 120, p. 214-261. DOI [10.1016/j.jbusres.2020.07.044](https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.07.044).

LI, Y.; TAN, K. H.; YANG, E.-H. Influence of aggregate size and inclusion of polypropylene and steel fibers on the hot permeability of ultra-high-performance concrete (UHPC) at elevated temperature. **Constr. Build. Mater.**, 2018, v. 169, p. 629-637. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2018.01.105](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.105).

- LIEDER, M.; ASIF, M. A. F.; RASHID, A.; MIHELIC, A.; KOTNIK, S. Towards circular economy implementation in manufacturing systems using a multi-method simulation approach to link design and business strategy. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, 2017, v. 93, p.1953-1970. DOI [10.1007/s00170-017-0610-9](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0610-9).
- LONGHI, M. A.; RODRÍGUEZ, E. D.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; KIRCHHEIM, A. P. Valorisation of a kaolin mining waste for the production of geopolymers. **J. Clean. Prod.**, 2016, v. 115, p. 265-272. DOI [10.1016/j.jclepro.2015.12.011](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.011).
- LOTTERMOSER, B.G. Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes. **Elements**, 2011, v. 7, p. 405–410. DOI [10.2113/gselements.7.6.405](https://doi.org/10.2113/gselements.7.6.405).
- LU, J.X.; ZHAN, B.J.; DUAN, Z.H.; POON, C.S. Using glass powder to improve the durability of architectural mortar prepared with glass aggregates. **Mater. Des.**, 2017, v. 135, p. 102–111. DOI [10.1016/j.matdes.2017.09.016](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.016).
- LU, L.; LI, C.; ZHANG, G.; HU, X.; LIANG, B. Decomposition behavior of CaSO<sub>4</sub> during potassium extraction from a potash feldspar-CaSO<sub>4</sub> binary system by calcination. **Chin. J. Chem. Eng.**, 2018, v. 26, p. 838-844. DOI [10.1016/j.cjche.2017.10.001](https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.10.001).
- MACHI, A. E.; MABROUM, S.; TAHA, Y.; TAGNIT-HAMOU, A.; BENZAAZOUA, M. HAKKOU, R. Use of flint from phosphate mine waste rocks as an alternatives aggregate for concrete. **Constr. Build. Mater.**, 2021, v. 271. P. 121886. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2020.121886](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121886).
- MAO, Y.; LIU, J.; SHI, C. Autogenous shrinkage and drying shrinkage of recycled aggregate concrete: A review. **J. Clean. Prod.**, 2021, v. 295, p. 126435. DOI [10.1016/j.jclepro.2021.126435](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126435).
- MATINDE, E.; SIMATE, G. S.; NDLOVU, S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. **J. S. Afr. Inst. Min. Metall.**, 2018, v. 118, p. 825-844. DOI [10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5](https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5).
- MAZUMDER, A.K.; SHARMA, T.; RAO, T.C. Extraction of potassium from glauconitic sandstone by the roast-leach method. **Int. J. Miner. Process.**, 1993, v. 38, p. 111-123. DOI [10.1016/0301-7516\(93\)90068-L](https://doi.org/10.1016/0301-7516(93)90068-L).
- MCLEMORE, V. T. Nepheline Syenite. In: **Industrial Minerals & Rocks – Commodities, Markets and Uses**. 7<sup>a</sup> ed., Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., Colorado, 2009, p. 653-669.
- MEDINA, G.; BOSQUE, I. F. S.; FRÍAS, M.; ROJAS, M. I. S.; MEDINA, C. Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): Scientific and technical considerations. **J. Clean. Prod.**, 2017, v. 148, p. 467-476. DOI [10.1016/j.jclepro.2017.02.048](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.048).
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed., São Paulo: IBRACON, 2014.
- METSO:OUTOTEC. **Catálogo do classificador de ar inercial gravitacional**. Disponível em: <https://www.mogroup.com/pt/portfolio/classificadores-de-ar-inercial-gravitacional/>. Acesso em 17 de março de 2022.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Relatório Comitê Técnico de Desenvolvimento da Transformação mineral – CTM, Ano 2021**. Brasília, 2021,

198 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/relatorios-de-grupos-de-trabalho/relatorio-anual-ctm-2021-vfinal.pdf/view>. Acesso em: 25 jul. 2022.

MIRZAHOSSEINI, M.; RIDING, K.A. Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM). **Cem. Concr. Compos.** 2015, v. 56, p. 95–105. DOI [10.1016/j.cemconcomp.2014.10.004](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.004).

MITROVIC, A.; ZDUJIC, M. Preparation of pozzolanic addition by mechanical treatment of kaolin clay. **Int. J. Miner. Process.**, 2014, v. 132, p. 59-66. DOI [10.1016/j.minpro.2014.09.004](https://doi.org/10.1016/j.minpro.2014.09.004).

MODARRES, A.; HESAMI, S.; SOLTANINEJAD, M.; MADANI, H. Application of coal waste in sustainable roller compacted concrete pavement-environmental and technical assessment. **Int. J. Pavement Eng.**, 2018, v. 19, p. 748–761. DOI [10.1080/10298436.2016.1205747](https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1205747).

MOHAMMED, S. M. O.; BRANDT, K.; GRAY, N. D.; WHITE, M. L.; MANNING, D. A. C. Comparison of silicate minerals as sources of potassium for plant nutrition in sandy soil. **Eur. J. Soil Sci.**, 2014, v. 65, p. 653-662. DOI [10.1111/ejss.12172](https://doi.org/10.1111/ejss.12172).

MORIMOTO, C. N. Nomenclature of Pyroxenes. **Miner. Petrol.**, 1988, v. 39, p. 55-76. DOI [10.1007/BF01226262](https://doi.org/10.1007/BF01226262).

MOTASEMI, F.; AFZAL, M. A review on the microwave-assisted pyrolysis technique. **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 2013, v. 28, p. 317-330. DOI [10.1016/j.rser.2013.08.008](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.008).

MOSER, R. D.; JAYAPALAN, A. R.; GARAS, V. Y.; KURTIS, K. E. Assessment of binary and ternary blends of metakaolin and Class C fly ash for alkali-silica reaction mitigation in concrete. **Cem. Concr. Res.**, 2010, v. 40, p. 1164-1672. DOI [10.1016/j.cemconres.2010.08.006](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.08.006).

MUCSI, G.; PAPNÉ, N. H.; ULSEN, C.; FIGUEREDO, P. O.; KRISTÁLY, F. Mechanical Activation of Construction and Demolition Waste in Order to Improve Its Pozzolanic Reactivity. **Sustain. Chem. Eng.**, 2021, v. 9, p. 3416-3427. DOI [10.1021/acssuschemeng.0c05838](https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05838).

NASIR, M. H. A.; GENOVESE, A.; ACQUAYE, A. A.; KOH, S. C. L.; YAMOAH, F. Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry. **Int. J. Prod. Econ.**, 2017, v. 183, p. 443-457. DOI [10.1016/j.ijpe.2016.06.008](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.06.008).

NGUYEN, H.; KUNTHER, W.; GIJBELS, K.; SAMYN, P.; CARVELLI, V.; ILLIKAINEN, M.; KINNUNEN, P. On the retardation mechanisms of citric acid in ettringite-based binders. **Cem. Con. Res.**, 2021, v. 140, p. 1063115. DOI [10.1016/j.cemconres.2020.106315](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106315).

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2016.

NOGUEIRA, T. A. R.; MIRANDA, B. G.; JALAL, A.; LESSA, L. G. F.; FILHO, M. C. M. T.; MARCANTE, N. C.; ABREU-JUNIOR, C. H.; JANI, A. D.; CAPRA, G. F.; MOREIRA, AA.; MARTINS, E. S. Nepheline Syenite and Phonolite as Alternative

Potassium Sources for Maize. **Agronomy**, 2021, v. 11, p. 1385.  
DOI [10.3390/agronomy11071385](https://doi.org/10.3390/agronomy11071385).

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS). **Transformando Nosso Mundo: A agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2020, 49 f. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em 14 out. 2020.

OLIVEIRA, K. A. **Sistemática CPQvA para a valorização de resíduos sólidos industriais: Um guia para tomada de decisão**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/189711>. Acesso em 23 set. 2020.

ORRIS, G. J.; COCKER, M.D.; DUNLAP, P.; WYNN, J.; SPANSKI, G.T.; BRIGGS, D.A.; GASS, L. **Potash – A Global Overview of Evaporite-Related Potash Resources, Including Spatial Databases of Deposits, Occurrences, and Permissive Tracts**. In – Global mineral resource assessment. US Geological Survey Investigations, 2014, Report 2010-5090-S, 76. DOI [10.3133/sir20105090S](https://doi.org/10.3133/sir20105090S).

PANESAR, D. K.; ZHANG, R. Performance comparison of cement replacing materials in concrete: Limestone fillers and supplementary cementing materials – A review. **Constr. Build. Mater.**, 2020, v. 251, p. 118866. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118866>.

PARIS, J. M.; ROESSLER, J. G.; FERRARO, C. C.; DEFORD, H. D. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **J. Clean. Prod.**, 2016, v. 121, p. 1-18. DOI [10.1016/j.jclepro.2016.02.013](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013).

RAUPP-PEREIRA, F. R., 2006. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentíceas**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais). Engenharia Cerâmica e do Vidro - Universidade de Aveiro, 2006. Disponível em: <https://ria.ua.pt/handle/10773/4909>. Acesso em 21 abr. 2020.

PIETZSCH, N.; RIBEIRO, J.L.D.; DE MEDEIROS, J.F. Benefits, challenges and critical factors of success for Zero Waste: A systematic literature review. **Waste Manage.**, 2017, v. 67, p. 324-353. DOI [10.1016/j.wasman.2017.05.004](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.004).

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

RAZAK, H. A.; CHAI, H. K.; WONG, H. S. Near surface characteristics of concrete containing supplementary cementing materials. **Cem. Concr. Comp.**, 2004, v. 26, p. 883-889. DOI [10.1016/j.cemconcomp.2003.10.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.10.001).

RECENA, F. A. P. **Conhecendo a argamassa**. 2 ed. Porto Alegre: Editora Universitária PUCRS, 2012.

RODRÍGUEZ, J.; FRÍAS, M.; TÓBON, J. Eco-efficient cement based on activated coal washing rejects with low content of kaolinite. **Constr. Build. Mater.**, 2021, v. 274, p. 122118. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2020.122118](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122118).

- SABBATINI, F. H. Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente. Boletim Técnico, PCC, nº 02, 28 f. Escola Politécnica, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 1986. Disponível em: [http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT\\_00002.pdf](http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00002.pdf). Acesso em 19 jul. 2021.
- 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. **J. Mater. Process. Technol.**, 2009, v. 209, p. 1240-1246. DOI [10.1016/j.jmatprotec.2008.03.033](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.033).
- SALMENPERA, H.; PITKANEN, K.; KAUTTO, P.; SAIKKU, L. Critical factors for enhancing the circular economy in waste management. **J. Clean. Prod.**, 2021, v. 280, p. 124339. DOI [10.1016/j.jclepro.2020.124339](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124339).
- SAMANTRAY, J.; ANAND, A.; DASH, B.; GHOSH, M. K.; BEHERA, A. K. Silicate minerals - Potential source of potash - A review. **Minerals Eng.**, 2022, v. 179, p. 107463. DOI [10.1016/j.mineng.2022.107463](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107463).
- SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A.; BRAGA, P.F.A. Nefelina Sienito, In: **Rochas e minerais industriais**, Cent. Tecnol. Min., 2ª Ed, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.
- SANTOS, D. H. **Substituição total do agregado natural por quartzito friável para produção de argamassas mistas de assentamento e revestimento**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6522>. Acesso em 12 mar. 2023.
- SANTOS, J. W. **Desenvolvimento de metodologia de dosagem de argamassas de revestimento e assentamento**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/6865>. Acesso em 04 jun. 2020.
- SANTOS, J. J. A. **Intrusão Sienítica do Complexo Alcalino Floresta Azul, Bahia: Mineralogia e Geoquímica**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2016. Disponível em: <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/5396>. Acesso em 04 dez. 2023.
- SEDIRA, N.; CASTRO-GOMES, J. Effect of activators on hybrid alkaline binder based on tungsten mining waste and ground granulated blast furnace slag. **Constr. Build. Mater.**, 2020, v. 232, p. 117176. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2019.117176](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117176).
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). **Anuário Estatístico: Setor Não Metálicos – Cimento**. SGB, 2023. Disponível em: [https://p3m.cprm.gov.br/estatisticas.html#pp\\_nacionais](https://p3m.cprm.gov.br/estatisticas.html#pp_nacionais). Acesso em 15 dez. 2023.
- SIDDIQUE, S.; JANG, J. G. Assessment of molybdenum mine tailings as filler in cement mortar. **J. Build. Eng.**, 2020, v. 31, p. 101322. DOI [10.1016/j.jobbe.2020.101322](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101322).
- SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Dados do Setor Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/noticias-ver.php?id=28>. Acesso em 09 fev. 2021.

SINGH, J., ORDONEZ, I. Resource recovery from post-consumer waste: Important lessons for the upcoming circular economy. **J. Clean. Prod.**, 2016, v. 134, p. 342-353. DOI [10.1016/j.jclepro.2015.12.020](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.020).

SIREGAR, A. P. N.; RAFIQ, M. I.; MULHERON, M. Experimental investigation of the effects of aggregate size distribution on the fracture behaviour of high strength concrete. **Constr. Build. Mater.**, 2017, v. 150, p. 252-259. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2017.05.142](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.142).

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS (SINIR). **Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos – 2019**. Brasília, 2019, 55 f. Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em 12 ago. 2021.

SILVA, C. A.; ELLEFMO, S. L.; SANDOY, R.; SORENSEN, B. E.; AASLY, K. A neural network approach for spatial variation assessment – A nepheline syenite case study. **Miner. Eng.**, 2020, v. 149, p. 106178. DOI [10.1016/j.mineng.2019.106178](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106178).

SOLTANINEJAD, M.; SOLTANINEJAD, M.; SABERI, F.; MOSHIZI, M. K.; SADEGHI, V.; JAHANBAKSH, P. Environmental-friendly mortar produced with treated and untreated coal wastes as cement replacement materials. **Clean Techn. Environ. Policy**, 2021, v. 23, p.2843-2860. DOI [10.1007/s10098-021-02204-x](https://doi.org/10.1007/s10098-021-02204-x).

TAFESSE, M.; LEE, H.K.; ALEMU, A.S.; KIM, H.-K.; PYO, S. On the expansive cracking of a cement matrix containing atomized basic oxygen furnace slag with a metallic iron. **Constr. Build. Mater.**, 2020, v. 264, p. 119806. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2020.119806](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119806).

TAN, J.; TAN, F. J.; RAMAKRISHNA, S. Transitioning to a circular economy: a systematic review of its drivers and barriers. **Sustainability**, 2022, v. 14, p. 1757. DOI [10.3390/su14031757](https://doi.org/10.3390/su14031757).

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

TOLSTOY, A.; LESOVIK, V.; FEDIUK, R.; AMRAN, M.; GUNASEKARAN, M.; VATIN, N.; VASILEV, Y. Production of Greener High-Strength Concrete Using Russian Quartz Sandstone Mine Waste Aggregates. **Materials**, 2020, v. 13, p. 5575. DOI [10.3390/ma13235575](https://doi.org/10.3390/ma13235575).

TOMIC, T.; SCHNEIDER, D. R. Circular economy in waste management – Socio-economic effect of changes in waste management system structure. **J. Environ. Manage.**, 2020, v. 267, p. 110564. DOI [10.1016/j.jenvman.2020.110564](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110564).

VEGAS, I.; CANO, M.; ARRIBAS, I.; FRÍAS, M.; RODRÍGUEZ, O. Physical–mechanical behavior of binary cements blended with thermally activated coal mining waste. **Constr. Build. Mater.**, 2015, v. 99, p. 169-174. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2015.07.189](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.189).

VIDAL, F.V.; AZEVEDO, H.C.A.; CASTRO, N. F. Lavra de rochas ornamentais. In: **Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, lavra e beneficiamento**. Cent. Tecnol. Min., Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2014.

VILAÇA, A. S. I.; SIMÃO, L.; MONTEDO, O. R. K.; NOVAES DE OLIVEIRA, A. P.; RAUPP-PEREIRA, F. Waste valorization of iron ore tailings in Brazil: Assessment metrics from a circular economy perspective. **Resour. Pol.**, 2022, v. 75, p. 102477. DOI [10.1016/j.resourpol.2021.102477](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102477).

VOLKMANN, A. R. **Estudos de rotas de beneficiamento da Nefelina Sienito para aplicação como fundente na massa cerâmica do porcelanato**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Engenharia de Minas e dos Materiais – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/5748>. Acesso em 21 set. 2020.

WANG, H.; TANG, Y.; XU, Y. S.; ZHANG, H.; LV, Z. H.; QIN, S. X.; SONG, Y. W. Textures and Chemical Compositions of Nb-Bearing Minerals and Nb Mineralization in the Shuangshan Nepheline Syenite Pluton, East Qinling, China. **Minerals**, 2021, v. 11, p. 1163. DOI [10.3390/min11111163](https://doi.org/10.3390/min11111163).

WEI, J.; GENCTURK, B.; JAIN, A.; HANIFEHZADEH, M. Mitigating alkali-silica reaction induced concrete degradation through cement substitution by metakaolin and bentonite. **Appl. Clay Sci.**, 2019, v. 182, p. 105257. DOI [10.1016/j.clay.2019.105257](https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105257).

WEISHI, L.; GUOYUAN, L.; YA, X.; QIFEI, H. The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings. **J. Clean. Prod.**, 2018, v. 204, p. 685–692. DOI [10.1016/j.jclepro.2018.08.309](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.309).

WESTERHOLM, M.; LAGERBLAD, B.; SILFWERBRAND, J.; FORSSBERG, E. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. **Cem. Concr. Compos.**, 2008, v. 30, p. 274-282. DOI [10.1016/j.cemconcomp.2007.08.008](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.008).

WINTER, J. D. **Principles of Igneous and Metamorphic Petrology**. v. 1. 2<sup>a</sup> ed.; Harlow, Pearson New International Edition, 2014.

WORLANYO, A. S.; JIANGFENG, L. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review. **J. Environ. Manage.**, 2021, v. 279, p. 111623. DOI [10.1016/j.jenvman.2020.111623](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111623).

WU, H.; XU, J.; YANG, D.; MA, Z. Utilizing thermal activation treatment to improve the properties of waste cementitious powder and its newmade cementitious materials. **J. Clean. Prod.**, 2021, v. 322, p. 129074. DOI [10.1016/j.jclepro.2021.129074](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129074).

YU, C.; SUN, W.; SCRIVENER, K. Mechanism of expansion of mortars immersed in sodium sulfate solutions. **Cem. Concr. Res.**, 2013, v. 43, p. 105-111. DOI [10.1016/j.cemconres.2012.10.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.001).

YURTDAS, I.; BURLION, N.; SKOCZYLAS, F. Triaxial mechanical behaviour of mortar: Effects of drying. **Cem. Concr. Res.**, 2004, v. 34, p. 1131-1143. DOI [10.1016/j.cemconres.2003.12.004](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.004).

ZHANG, Y.; LING, T.-C. Reactivity activation of waste coal gangue and its impact on the properties of cement-based materials – A review. **Constr. Build. Mater.**, 2020, v. 234, p. 117424. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2019.117424](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117424).

ZHANG, W.; ZAKARIA, M.; HAMA, Y. Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. **Constr. Build. Mater.**, 2013, v. 49, p. 500-510. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2013.08.069](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.069).

ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. **Constr. Build. Mater.**, 2014, v. 50, p. 540-548. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2013.10.019](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.019).

ZOZULYA, D.; LYALINA, L.; MACDONALD, R.; BAGINSKI, B.; SAVCHENKO, Y.; JOKUBAUSKAS, P. Britholite Group Minerals from REE-Rich Lithologies of Keivy Alkali Granite—Nepheline Syenite Complex, Kola Peninsula, NW Russia. **Minerals**, 2019, v. 9, p. 732. DOI [10.3390/min9120732](https://doi.org/10.3390/min9120732).