



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS



CLAUDIA YANARA MEIRA DA COSTA

EFEITO COMBINADO DE TRATAMENTO FÍSICO-TÉRMICO DO RESÍDUO
DA SCHEELITA NAS ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND

MOSSORÓ/RN

2022

CLAUDIA YANARA MEIRA DA COSTA

**EFEITO COMBINADO DE TRATAMENTO FÍSICO-TÉRMICO DO RESÍDUO
DA SCHEELITA NAS ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Materiais e processos para sustentabilidade do semiárido

Linha de Pesquisa: Aplicações tecnológicas de materiais regionais

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Nogueira de Codes.

Coorientador: Prof. Dr. Alisson Gadelha de Medeiros.

MOSSORÓ/RN

2022

CLAUDIA YANARA MEIRA DA COSTA

**EFEITO COMBINADO DE TRATAMENTO FÍSICO-TÉRMICO DO RESÍDUO
DA SCHEELITA NAS ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Linha de Pesquisa: Aplicações tecnológicas de materiais regionais.

Defendida em: 02/09/2022.

BANCA EXAMINADORA

**RODRIGO NOGUEIRA DE
CODES:62534670344**

Assinado de forma digital por RODRIGO
NOGUEIRA DE CODES:62534670344
Dados: 2022.09.04 13:41:02 -03'00'

Rodrigo Nogueira de Codes, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente (Orientador)

ALISSON GADELHA DE MEDEIROS:08445526405

Digitally signed by ALISSON GADELHA DE MEDEIROS:08445526405
Date: 2022.09.04 14:08:59 -03'00'

Alisson Gadelha de Medeiros, Prof. Dr. (UFERSA)
Coorientador

MARILIA PEREIRA DE OLIVEIRA:02313364461

Assinado de forma digital por MARILIA PEREIRA DE
OLIVEIRA:02313364461
Dados: 2022.09.05 15:02:37 -03'00'

Marília Pereira de Oliveira, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador

MARIA DAS VITORIAS VIEIRA ALMEIDA DE SA

PRO-REITOR(A) - TITULAR

PROGRAD (11.03)

Matrícula: ###078#1

Maria das Vitórias Almeida Vieira de Sá, Profa. Dra. (UFRN)
Membro Externo à Instituição

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrn.br/documentos/> informando 0 no campo de número, ano: 2022, tipo: ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO, data de emissão: 06/09/2022 e o código de verificação: 7822b53230

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C837 Costa, Claudia Yanara Meira da.
EFEITO COMBINADO DE TRATAMENTO FÍSICO-TÉRMICO
DO RESÍDUO DA SCHEELITA NAS ARGAMASSAS DE CIMENTO
PORTLAND / Claudia Yanara Meira da Costa. - 2022.
89 f. : il.

Orientador: Rodrigo Nogueira de Codes.
Coorientador: Alisson Gadelha de Medeiros.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais, 2022.

1. Tratamento físico-térmico das partículas. 2.
Atividade pozolânica. 3. Propriedades físico-
mecânicas. 4. Substituição parcial. 5. Correlação
digital de imagens. I. Codes, Rodrigo Nogueira de
, orient. II. Medeiros, Alisson Gadelha de , co-
orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo) autor(a).

Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência

Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva

CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por minha vida e saúde, e por me rodear de tantas pessoas maravilhosas.

À minha família, em especial à William, Amélia, Clara e Felipe, que são a minha base. Sem vocês eu não seria capaz de ser feliz e ter forças para vencer as dificuldades.

À Anderson, por ter tanta paciência comigo e estar sempre ao meu lado, mesmo quando não mereço.

Ao meu orientador, Rodrigo Codes, e ao coorientador, Alisson Gadelha, por continuar compartilhando conhecimento comigo e acreditar em meu potencial.

Aos meus amigos da minha eterna família de ovelhas negras, Arilania, Mikaelly, Lucas, Cris, Joiza, Sandeje, Josy, Tayrine e Wesley. E, em especial, agradeço a Fellipe e Ycaro por serem meus companheiros durante a execução de todos os ensaios.

À Karen, pela amizade, confiança, incentivo profissional e por ter apoiado o meu crescimento.

À Edgley, amigo que ganhei nos primeiros passos dessa jornada e que esteve comigo durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Obrigada por todo suporte oferecido.

À minha nova família dos ventos, que diariamente compartilha seus conhecimentos comigo. Obrigada por todo incentivo e cuidado.

Ao Laboratório de Ensaios Mecânicos da UFERSA, em especial ao técnico de laboratório, Fabricio Almeida.

Ao professor Alexandre, pela disponibilidade do nitrogênio líquido.

Às instituições de ensino UFERSA e UnP, as quais foram suportes de infraestrutura para viabilizar todo procedimento experimental.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, pelos professores, estruturas e recursos para viabilização desta pesquisa.

E a todos aqueles que não foram citados, mas contribuíram de alguma forma para a conclusão desta dissertação.

RESUMO

Com o intuito de reduzir os impactos ambientais causados pelo acúmulo de resíduos gerados pelas mais diversas atividades econômicas e industriais, tem-se estudado formas de utilização desses resíduos como materiais alternativos para a construção civil. A atividade mineradora brasileira produz anualmente cerca de 1,15 milhões de toneladas de minérios, resultando em elevada deposição de resíduos dos materiais explorados. A exploração do tungstênio gera os resíduos de scheelita, sendo constituídos principalmente por SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e Fe_2O_3 , composição química importante para a produção de materiais cimentícios. Neste sentido, esta pesquisa objetiva avaliar as propriedades de argamassas de cimento Portland produzidas com substituição parcial simultânea do aglomerante cimentício por resíduo de scheelita fino termicamente tratado, e substituição do agregado miúdo areia por resíduo da scheelita grossa, com seleção física-granulométrica com otimização do empacotamento de partículas na mistura. Para analisar os efeitos das substituições, foram realizados ensaios no estado fresco (índice de consistência e massa específica) e no estado endurecido (resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, absorção e porosidade, e absorção por capilaridade), nas idades de 28 e 120 dias. Além das propriedades físicas e mecânicas, no estado endurecido, também foram realizadas análises da microestrutura através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e termogravimetria nas argamassas. A técnica de Correlação Digital de Imagens (CDI) foi empregada junta ao ensaio de resistência à tração na flexão, visando obter os campos de deslocamento e deformações. As substituições se mostraram viáveis, pois houve melhoria no empacotamento das partículas, incrementos na resistência à compressão e à tração na flexão, redução na absorção e porosidade e na absorção por capilaridade. A técnica de CDI permitiu gerar curvas tensão x deformação e calcular a abertura de fissura das argamassas. Com base nos resultados encontrados, foi possível determinar que o melhor traço estudado foi o com composição de 81% de resíduo de scheelita grosso substituindo a massa da areia e 5% de resíduo de scheelita fino substituindo o cimento.

Palavras-chave: Tratamento físico-térmico das partículas. Atividade pozolânica. Propriedades físico-mecânicas. Substituição parcial. Correlação digital de imagens. Sustentabilidade.

ABSTRACT

In order to reduce the environmental impacts caused by the accumulation of waste generated by the most diverse economic and industrial activities, we have studied ways of using these wastes as alternative materials for civil construction. The Brazilian mining activity produces about 1.15 million tons of ore tailings annually, resulting in high tailings deposition of the materials explored. The exploitation of tungsten generates the scheelite tailings, consisting mainly of SiO_2 , Al_2O_3 , CaO and Fe_2O_3 , important chemical composition for the production of cementitious materials. In this sense, this research aims to evaluate the properties of Portland cement mortars produced with simultaneous partial replacement of cementitious binder by thermally treated fine scheelite tailing, and replacement of the sand fine aggregate by coarse scheelite tailing, with physical-granulometric selection with optimization of particle packaging in the mixture. To analyze the effects of substitutions, tests were performed in the fresh state (consistency index and specific mass) and in the hardened state (axial compressive strength, flexural tensile strength, absorption and porosity, and capillarity absorption) at the ages of 28 and 120 days. In addition to the physical and mechanical properties, in the hardened state, microstructure analyses were also performed by scanning electron microscopy (SEM) and thermogravimetry in mortars. The Digital Image Correlation (DIC) technique was used together with the tensile strength test in flexion, aiming to obtain the fields of displacement and deformations. The substitutions proved to be viable, as there was an improvement in particle packaging, increases in compressive strength and flexural tensile strength, reduction in absorption and porosity and absorption by capillarity. The DIC technique allowed to generate stress x strain curves and calculate the crack opening of the mortars. Based on the results found, it was possible to determine that the best trace studied was the composition of 81% of coarse scheelite tailing replacing the sand mass and 5% of fine scheelite tailing replacing cement.

Keywords: Physical-thermal treatment of particles. Pozolanic activity. Physical-mechanical properties. Partial replacement. Digital correlation of images. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Configuração experimental para a aplicação da técnica de Correlação Digital de Imagens (2D).	23
Figura 2: Fluxograma Experimental.....	24
Figura 3: Ensaios de determinação das propriedades do cimento.	25
Figura 4: Ensaio de granulometria e massa específica da areia.	26
Figura 5: Imagens de satélite da Mina Brejuí.....	27
Figura 6: a) resíduo de scheelita grosso, b) resíduo de scheelita fino.	27
Figura 7: Determinação da massa específica do resíduo de scheelita grosso.....	28
Figura 8: Determinação da massa específica e do índice de atividade pozolânica do RSF.....	28
Figura 9: a) RSF calcinado; b) RSF calcinado e peneirado.....	30
Figura 10: Produção das argamassas.	33
Figura 11: Corpos de prova moldados após confecção das argamassas.	34
Figura 12: Formato dos corpos de prova; a) cilíndrico, b) cúbico, c) prismático.	35
Figura 13: Corpo de prova texturizado.....	36
Figura 14: Estrutura para a execução da CDI.....	37
Figura 15: Curvas granulométricas da areia e do RSG.	39
Figura 16: MEVs das partículas. a) areia, b) RSG.	40
Figura 17: DRX/FRX da areia e do RSG.	41
Figura 18: Análise de TG/DTG do resíduo de scheelita grosso.....	42
Figura 19: MEVs das partículas. a) cimento, b) RSF.....	44
Figura 20: DRX/FRX do cimento e do RSF.....	45
Figura 21: Análise da TG/DTG do resíduo de scheelita fino.....	45
Figura 22: Curva granulométrica do resíduo de scheelita fino natural e tratado.....	46
Figura 23: DRX/FRX do resíduo de scheelita fino tratado.	47
Figura 24: Curvas granulométricas das composições.....	49
Figura 25: Curvas de empacotamento das composições.	50
Figura 26: Resistência à compressão axial aos 28 e 120 dias.	52
Figura 27: Resistência à tração na flexão aos 28 e 120 dias.....	54
Figura 28: Absorção e porosidade das argamassas aos 28 dias.....	55
Figura 29: Absorção por capilaridade das argamassas aos 28 dias.	56
Figura 30: MEV de argamassa referência aos 28 dias, com aproximação de 1 kx.	57
Figura 31: MEV com EDS argamassa referência, aproximação de 300x.	58
Figura 32: MEV de argamassa T81%/5 aos 28 dias.....	59
Figura 33: MEV de argamassa T815/10 aos 28 dias.	60
Figura 34: MEV de argamassa T81%/20 aos 28 dias.....	61
Figura 35: MEV de argamassa referência aos 120 dias.....	61
Figura 36: MEV argamassa T81%/5 aos 120 dias.	62
Figura 37: MEV argamassa T81%/10 aos 120 dias.	63
Figura 38: MEV argamassa T81%/20 aos 120 dias.	63
Figura 39: Curvas TG/DTG da argamassa de referência aos 120 dias.....	64
Figura 40: Curvas TG/DTG da argamassa T81%/5 aos 120 dias.....	65
Figura 41: Curvas TG/DTG da argamassa T81%/10 aos 120 dias.....	66
Figura 42: Curvas TG/DTG da argamassa T81%/20 aos 120 dias.....	67

Figura 43: Campos cinemáticos para a argamassa referência na ruptura.....	69
Figura 44: Gauges selecionados para análise das deformações.	70
Figura 45: Campos cinemáticos para a argamassa T81%/5 na ruptura.....	70
Figura 46: Campos cinemáticos para a argamassa T81%/10 na ruptura.....	71
Figura 47: Campos cinemáticos para a argamassa T81%/20 na ruptura.....	72
Figura 48: Curvas tensão x deformação obtidas pela CDI.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limites dimensionais da distribuição granulométrica do agregado miúdo. ...	31
Tabela 2: Nomenclatura dos traços produzidos.....	32
Tabela 3: Quantitativo e formato de corpos de prova por ensaio.....	34
Tabela 4: Propriedades físicas da areia e do RSG.....	40
Tabela 5: Propriedades do cimento.	43
Tabela 6: Propriedades do RSF.	43
Tabela 7: Tamanho das partículas do cimento e do RSF.	44
Tabela 8: Índice de atividade pozolânica pelo Método de Chapelle Modificado.	47
Tabela 9: Índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias.....	48
Tabela 10: Propriedades das argamassas no estado fresco.....	51

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para construção

ANOVA - Análise de Variância

Ca/Si – Relação Cálcio e Sílica

CaCO₃- Calcita (Carbonato de Cálcio)

CaO – Óxido de Cálcio

CDI - Correlação digital de imagens

COM - Curva Ótima Média

CSH - Silicato de Cálcio Hidratado

CTGAS – ER - Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis

DRX - Difração de Raios-X

FRX - Fluorescência de Raios-X

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

MMQ - Método dos Mínimos Quadrados

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

REF - Referência

ROI - Região de interesse

RSF - Resíduo de scheelita fino

RSG - Resíduo de scheelita grosso

TFD - Teor Fixado a ser determinado

TG/DTG - Termogravimetria/Diferencial de Termogravimetria

UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido

UNP - Universidade Potiguar

ZOI – Zona de interesse

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. JUSTIFICATIVA	13
1.2. OBJETIVOS	13
1.2.1. Objetivo Geral	13
1.2.2. Objetivos Específicos	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. ARGAMASSAS	15
2.1.1. Propriedades do estado fresco	15
2.1.2. Propriedades do estado endurecido	16
2.2. RESÍDUO DA SCHEELITA.....	17
2.3. EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS EM COMPOSTOS CIMENTÍCIOS	18
2.4. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	20
2.4.1. Utilização de resíduos de mineração em materiais cimentícios.....	21
2.5. CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS.....	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1. MATERIAIS.....	25
3.1.1. Cimento Portland	25
3.1.2. Areia natural	25
3.1.3. Resíduo de scheelita	26
3.1.4. Água	29
3.2. MÉTODOS	29
3.2.1. Tratamento do resíduo de scheelita fino.....	29
3.2.2. Compatibilização granulométrica do resíduo grosso	30
3.2.3. Definição das Composições	31
3.2.4. Ensaio das argamassas no estado fresco e moldagem	32
3.2.5. Ensaio das argamassas no estado endurecido	34
3.2.6. Correlação Digital de Imagens	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1. AREIA E RESÍDUO DE SCHEELITA GROSSO.....	39
4.2. CIMENTO E RESÍDUO DE SCHEELITA FINO	43
4.2.1. Resíduo de scheelita fino tratado	46
4.3. COMPATIBILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA	48
4.3.1. Empacotamento das Partículas	49
4.4. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	51

4.4.1.	Índice de consistência e massa específica	51
4.5.	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	
4.5.1.	Resistência à compressão axial.....	52
4.5.2.	Resistência à tração na flexão.....	53
4.5.3.	Absorção e porosidade	54
4.5.4.	Absorção por capilaridade.....	56
4.5.5.	Análise microestrutural e termogravimétrica	57
4.6.	CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS – CDI.....	68
4.6.1.	Campos cinemáticos	68
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
6.	REFERÊNCIAS	78

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas têm-se aumentado as discussões a respeito dos impactos causados pelos seres humanos decorrentes da exploração dos recursos naturais para a produção de bens de consumo e de energia. As principais preocupações se dão no âmbito do desenvolvimento sustentável e na redução da poluição dos sistemas ambientais (MARQUES et al., 2020).

Um dos pontos de maior destaque é com relação a elevada geração de resíduos sólidos que, em sua maior parte, não possuem destinação específica e correta. Nesse contexto, os resíduos das atividades agrícolas, industriais, construção civil e mineração são os mais notórios; pois o mal acondicionamento dos seus resíduos em locais e condições inadequadas podem resultar em diversos impactos ambientais (CHOI et al., 2009; SHAFIGH et al., 2014).

Ademais, a cadeia produtiva da construção civil referente aos materiais cimentícios, é uma das grandes responsáveis pelo consumo de recursos naturais e emissão de gases do efeito estufa (CHEN et al., 2019). Em 2019, o Brasil consumiu 64,5 milhões de toneladas de cimento, sendo o Nordeste a segunda região com maior consumo, resultando em 14,2 milhões de toneladas (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC, 2021).

Ainda com relação ao setor construtivo, deve-se também considerar relevante o consumo brasileiro de agregados. A Associação Nacional das Entidades Produtoras de Agregados para construção (ANEPAC) estimou que no ano de 2021, o Brasil consumiu o equivalente a 660 milhões de toneladas de agregados, sendo 385 milhões de toneladas apenas de areia.

Diante de tamanha exploração dos recursos naturais, nos últimos anos, pesquisas a nível mundial investigam incorporações de resíduos em substituições parciais ou totais afim de soluções de reutilização desses (BOUZIDI; BOUZIDI; TAHAKOURT, 2018; CHOI et al., 2009; SEDIRA; CASTRO-GOMES; MAGRINHO, 2018).

A incorporação de resíduos na produção de materiais de construção objetiva além de uma destinação ambientalmente adequada para estes, como também o aprimoramento das propriedades dos materiais resultantes. As propriedades térmicas dos concretos e

argamassas desempenham um papel importante na sustentabilidade da infraestrutura das edificações. Variações bruscas de temperatura podem induzir tensões de tração excessivas, causando fissuras na superfície e na seção transversal dos elementos (SAHA; SARKER; GOLOVANEVSKIY, 2019). Melhorias no desempenho térmico dos materiais de construção podem ajudar na redução da energia necessária para o resfriamento ou aquecimento dos edifícios e, dessa forma, reduzir o uso de combustíveis fósseis (LIU et al., 2014).

A mineração é uma das principais atividades econômicas do Brasil, com uma produção anual de mais de 1,15 milhões de toneladas, representando um faturamento de R\$ 339 bilhões no ano de 2021 (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM, 2022).

Os resíduos de scheelita são materiais sólidos resultantes da atividade exploratória de minas de tungstênio, sendo constituídos principalmente por SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e Fe_2O_3 (PENG; LV; YANG, 2014). A produção de 1 tonelada de tungstênio concentrado resulta em 9 toneladas de resíduo do mineral (LIU et al., 2011). De acordo com Medeiros et al. (2019), a maior exploração brasileira de tungstênio é no estado do Rio Grande do Norte (RN), na região do Seridó.

De acordo com Peng, Yang e Ouyang (2015), a atividade mineradora e o processamento de minerais geram grande quantidade de resíduos com minerais associados, e a produção de materiais cimentícios com esses resíduos representa uma importante prática de substituição as matérias primas naturais normalmente empregadas, com garantia da viabilidade técnica dos materiais produzidos.

Diante deste panorama, a presente pesquisa visa avaliar o potencial de utilização do resíduo da scheelita para produção de argamassa de cimento Portland através da substituição parcial simultânea do cimento pelo resíduo fino termicamente tratado (para verificar possível ativação de suas propriedades pozolânicas); bem como na substituição da areia pelo resíduo grosso, visando obter o melhor empacotamento das partículas em materiais cimentícios. Outrossim, permitindo a ampliação do ciclo de vida desse material em benefício das indústrias da construção civil e de mineração.

1.1. JUSTIFICATIVA

Visando otimizar o consumo de subprodutos industriais em detrimento dos recursos naturais aplicados a engenharia civil, tem-se buscado alternativas que sejam ambientalmente corretas, socialmente justas e economicamente viáveis (SHAFIGH et al., 2014). A indústria produtora do cimento é responsável pela emissão de cerca de 6% de dióxido de carbono no mundo (SHANKS et al., 2019).

Na atividade de mineração há grande quantidade de geração de resíduos, principalmente provenientes dos processos de extração e tratamento/beneficiamento dos minerais (PENG; YANG; OUYANG, 2015). Afum, Caverson e Bem-Awuah (2019) relatam que esses resíduos contaminam os solos, os corpos de águas, modificam as paisagens e mostram que os resíduos de mineração apresentam potencial de reuso, com vantagens econômicas e ambientais.

Desse modo, faz-se necessária a caracterização desses materiais que podem ser aplicados como adições ou substituições, assim como a investigação da influência destes materiais nas propriedades e características dos materiais que os incorporam.

Além disso, o elevado consumo dos recursos naturais para aplicações na indústria da construção civil, bem como os impactos ambientais gerados por esta, faz com que seja necessária a busca por materiais alternativos aos convencionais de forma a contribuir com a sustentabilidade do meio ambiente.

Considerando-se o acúmulo do resíduo de scheelita na região do semiárido potiguar, é essencial a busca por possíveis destinações sustentáveis desse material, justificando-se estudar sua incorporação em materiais cimentícios, de forma a se obter alternativas técnicas e econômicas nesse setor produtivo e minimizar os impactos ambientais do processo exploratório da atividade mineradora. Ressalta-se ainda que o presente Programa de Pós-Graduação está inserido na mesma região de produção do resíduo, o que reforça ainda mais a importância de pesquisas com esse material.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar as propriedades físico-mecânicas e químicas da argamassa produzida com substituição parcial simultânea do agregado miúdo por resíduo da scheelita natural com otimização granulométrica e do cimento por resíduo da scheelita termicamente tratado.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Obter a caracterização química, física e mineralógica do resíduo da scheelita;
- Identificar o teor de substituição do agregado miúdo pela scheelita que resulte em melhor empacotamento das partículas;
- Avaliar a influência do tratamento térmico nas características pozolânicas do resíduo da scheelita;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas de argamassa incorporada de resíduo da scheelita, no estado fresco e endurecido;
- Identificar produtos de hidratação através da microestrutura da argamassa;
- Obter os campos de deslocamento e deformações no ensaio de resistência à tração na flexão por técnica de correlação digital de imagens (CDI).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. ARGAMASSAS

As argamassas são materiais de construção compostos basicamente pela mistura homogênea de aglomerante, agregado e água, possuindo capacidade de aderência e endurecimento. Os aglomerantes são produtos utilizados com a finalidade de ligar os materiais, contribuindo para o endurecimento da pasta (FIORITO, 2015).

O aglomerante mais utilizado na construção civil é o cimento Portland, sendo este o material de construção mais consumido no mundo. O cimento está presente em todas as construções, sendo de fácil acesso e comercialização. Para a sua produção, é necessária a calcinação do clínquer à temperatura de 1450°C. Essa calcinação é feita utilizando-se, principalmente, combustíveis fósseis, resultando na elevada emissão de gases poluentes (SHANKS et al., 2019). Anualmente são produzidas mais de 4 bilhões de toneladas de cimento em todo o mundo (CURRY, 2020).

De acordo com a Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 13281:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos, pode-se classificar as argamassas em seis tipos a depender do seu emprego, sendo estes argamassa para assentamento, argamassa para revestimento de paredes e tetos, argamassa de uso geral, argamassa para reboco, argamassa decorativa de camada fina e argamassa decorativa em monocamada.

2.1.1. Propriedades do estado fresco

a) Trabalhabilidade, consistência e plasticidade

A trabalhabilidade é uma propriedade que determina a facilidade com a qual os componentes da argamassa podem ser misturados, transportados, aplicados e acabados, mantendo-se a homogeneidade da mistura. Outras propriedades tais como consistência, plasticidade, coesão, exsudação e retenção de água, são fatores que acarretam diretamente em mudanças na trabalhabilidade. A granulometria e formato dos agregados, bem como o tipo e quantidade do aglomerante também promovem alterações nesta propriedade (CARASEK, 2010).

A consistência e a plasticidade são duas propriedades que estão intimamente relacionadas a trabalhabilidade através da determinação da quantidade de água de amassamento da mistura. Para que se tenha uma plasticidade adequada a finalidade de utilização e a forma de aplicação, é necessário que se determine a quantidade ótima de água, ou seja, que se tenha uma consistência ideal, que depende do tipo e da quantidade dos materiais empregados. Devido essa dependência, essas três propriedades são condicionantes entre si (CARASEK, 2010).

A depender da quantidade de pasta presente, a consistência de uma argamassa pode ser seca, fluída ou plástica. Essa propriedade define o grau de facilidade de deformação da argamassa quando submetida a ação de tensões. Já a plasticidade indica a tendência de conservação da deformação da mistura após a retirada das tensões. O teor de finos é o parâmetro utilizado para classificar a plasticidade de uma argamassa, e esse teor varia com a introdução de aditivos a mistura (NEVILLE; BROOKS, 2010).

b) Retenção de água

A retenção de água trata-se da capacidade de uma argamassa manter propriedades qualificadas no estado fresco. Um alto valor desta propriedade significa que a argamassa não permite que a alvenaria absorva uma quantidade excessiva de água, sem perdas demasiadas que possam acarretar danos ao processo de endurecimento (BREITENBACH et al., 2017).

A capacidade de reter água é importante para a garantia da aderência ao substrato e ao progressivo ganho de resistência, minimizando a probabilidade da ocorrência de fissuras no revestimento (RECENA, 2012).

c) Densidade de massa

A massa específica de uma argamassa depende diretamente da massa específica dos seus materiais constituintes e do teor de ar presente na mistura. Uma argamassa baixa densidade, ou seja, leve possui maior facilidade de aplicação reduzindo o esforço do operário (GUILHERME; CABRAL; DE SOUZA, 2020).

2.1.2. Propriedades do estado endurecido

a) Aderência

Trata-se da capacidade de absorção e resistência a esforços normais e tangenciais por parte da argamassa, mantendo-se a fixação do revestimento ao substrato estável e sem fissuração. A aderência da argamassa em seu estado endurecido ao substrato ocorre basicamente devido a rugosidade da base e da penetração da pasta aglomerante nos poros desta. Essa propriedade é dependente tanto das características da argamassa quanto do substrato de aplicação (CARASEK, 2010).

b) Resistência mecânica

O modo como as argamassas suportam os esforços mecânicos aos quais são submetidas é definido como sendo sua resistência mecânica. As condições de confecção da argamassa, os tipos de materiais empregados, a quantidade de água utilizada no amassamento e sua forma de aplicação são fatores que influenciam em sua resistência final (CARASEK, 2010).

c) Durabilidade

A durabilidade de uma argamassa pode ser dita como a capacidade de manter suas características normais em termos químicos e físicos ao longo do tempo e em exposição as condições atmosféricas normais. Essa propriedade está intimamente relacionada à presença de umidade e a agressividade do meio; esses dois fatores são passíveis de promover manifestações patológicas que prejudicam o desempenho das argamassas para a finalidade na qual foram projetadas (RECENA, 2012).

2.2. RESÍDUO DA SCHEELITA

O Brasil possui 28000 toneladas de reserva lavrável em metal contido de tungstênio, representando 0,9% da reserva mundial deste mineral (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2019). Os minérios que contém o tungstênio no Brasil são a wolframita e a scheelita. Os principais depósitos de scheelita estão localizados nos estados do Rio Grande do Norte e na Paraíba. Em 2017, o RN produziu 593 toneladas do concentrado de tungstênio, somando-se uma quantia de cerca de R\$ 21,1 milhões (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM, 2018).

A mina Brejuí localizada no município de Currais Novos, no Rio Grande do Norte, é a maior mina de scheelita da América do Sul. Os resíduos de mineração são depositados em pilhas sobre o solo, e se acumulam desde o início das operações de mineração durante

a segunda guerra mundial (MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO, 2021; PETTA et al., 2014).

O processo de beneficiamento da scheelita na Mina Brejuí ainda encontra-se sendo realizado através de várias etapas e por processos rústicos. Os equipamentos funcionam por métodos gravimétricos, sem a utilização de efluentes químicos. O processo é iniciado com o uso de explosivos para realização de detonações no interior da mina, os fragmentos das rochas são levados para uma espécie de grelha que as separa de acordo com a granulometria (GERAB, 2014).

Ao passarem pela grelha, os fragmentos são transportados para o britador através de esteiras. Com a granulometria reduzida, o material é em seguida passado por peneiras vibratórias, em seguida ele é moído em moinho de martelos e transportados para jígues onde ocorre a separação hidráulica em função da densidade das partículas, sendo finalmente destinado as mesas vibratórias que promovem a separação final. A scheelita é seca sob o sol, sendo posteriormente estocada antes de passar pelo processo de retirada de impurezas, sendo então ensacada e comercializada (GERAB, 2014).

A execução das atividades realizadas na Mina Brejuí resulta na produção de cerca de 750 kg de resíduo para cada 250 kg do mineral concentrado extraído (MEDEIROS et al., 2019). O resíduo da scheelita exibe estabilidade química e mineralógica, apresentando-se em dois tipos de composição granulométrica, o resíduo grosso e o resíduo fino (CARVALHO; PETTA, 2002). E a composição química do resíduo mostra que ele se apresenta como um potencial substituto na composição de materiais cimentícios (CHOI et al., 2009; DJELLALI et al., 2019; MEDEIROS et al., 2019).

2.3. EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS EM COMPOSTOS CIMENTÍCIOS

Os agregados ocupam de 60 a 80% do volume de argamassas e concretos, podendo ser classificados de acordo com a sua granulometria como graúdo (tamanho das partículas superior a 4,75 mm) e miúdo (partículas inferiores a 4,75 mm). Os agregados são obtidos a partir de fontes naturais ou por processo de fragmentação de rochas, e a sua elevada exploração tem levado ao esgotamento das reservas naturais de obtenção destes (AL-JABRI et al., 2009; HEMALATHA; SANTHANAM, 2018).

A areia, agregado miúdo mais utilizado, assume parte importante na composição de argamassas e concretos. Ela tem impacto significativo nas propriedades de trabalhabilidade, durabilidade, resistência, peso e retração dos compostos cimentícios (DASH; PATRO; RATH, 2016). O empacotamento das partículas é um fator que influencia a estrutura de poros do material e, conseqüentemente, nas propriedades anteriormente citadas. O fator ótimo de empacotamento apresenta várias vantagens, tais como redução da quantidade de pasta de cimento para preencher os vazios (para uma mesma trabalhabilidade), melhora na resistência à compressão e redução da porosidade (DUVALLET et al., 2017; KWAN; FUNG, 2009; SANTOS et al., 2018).

Shettima et al. (2016) substituíram a areia por resíduo do minério de ferro nas porcentagens de 25%, 50%, 75% e 100%. Eles verificaram que a granulometria do resíduo era mais fina do que a da areia utilizada, se qualificando como uma espécie de areia de graduação fina. Ao compararem as propriedades de resistência à compressão e resistência à tração com o concreto sem utilização do resíduo, constataram que o concreto com 25% do resíduo apresentou maior resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias de idade. E a resistência à tração foi maior para todas as porcentagens de substituição quando comparadas com o concreto controle. Entretanto, a trabalhabilidade dos concretos diminuiu à medida que se aumentou a quantidade de substituição da areia.

Gallala et al. (2017) produziram argamassa de cimento Portland e substituíram a areia por resíduo de mineração da barita-fluorita nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. Eles verificaram que a porcentagem de substituição de 25% apresentou a maior resistência à compressão aos 28 dias, sendo possível a utilização do resíduo da barita-fluorita como substituição da areia na produção de concretos e argamassas, reduzindo custos e impactos ambientais.

Ince (2019) utilizou o resíduo de mineração do ouro como substituição do cimento e da areia, de forma isolada, nas proporções de 10%, 20% e 30% em argamassa. A distribuição de tamanho de partículas do resíduo foi menor do que a areia. Através dos seus resultados, ele constatou que a substituição do cimento e da areia pelo resíduo de ouro aumenta a resistência à compressão das argamassas, principalmente quando o resíduo substitui parcialmente a areia. A utilização do resíduo também resultou em diminuição da porosidade e da carbonatação das argamassas.

2.4. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Segundo Yagüe et al. (2018), pesquisadores têm se dedicado na busca da utilização de resíduos industriais e subprodutos nos processos de fabricação de cimentos e de materiais cimentícios. Os materiais utilizados como substituição de um dos componentes da matriz cimentícia são empregados visando melhorar as propriedades de argamassas e concretos. Os principais resíduos explorados em pesquisas são aqueles que apresentam potencial pozolânico (HEMALATHA; SANTHANAM, 2018).

As reações pozolânicas dos materiais dependem principalmente da sua composição química e da quantidade de sílica e alumina em fases amorfas que, quando combinadas com o hidróxido de cálcio e água, formam silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. Esses compostos resultantes das reações melhoram as propriedades mecânicas e de durabilidade dos materiais aos quais foram empregados (BUDAK; AKKURT; BÖKE, 2010; FENG et al., 2019; HEMALATHA; SANTHANAM, 2018; MATIAS; FARIA; TORRES, 2014).

É importante observar que os resíduos minerais normalmente não apresentam características cimentantes, sendo necessária a implementação de métodos para potencializar essas propriedades (SAEDI; JAMSHIDI-ZANJANI; DARBAN, 2020). Métodos de ativação comuns são por ativação mecânica, térmica e química. A ativação mecânica é realizada através da redução do tamanho de partículas e aumento da área superficial. A ativação química melhora a reatividade através da adição de produtos químicos (PENG; YANG; OUYANG, 2015). Já a ativação térmica é utilizada para a modificação da estrutura cristalina para amorfa (ALMEIDA et al., 2020b).

Picanço, Angélica e Barata (2012) estudaram a atividade pozolânica do arenito zeolítico passante nas peneiras #200 e #325 e calcinado às temperaturas de 150°C, 300°C e 500°C. O material passante na peneira #200 e calcinado a 500°C foi o que apresentou maior atividade pozolânica, em razão da modificação mais efetiva da estrutura cristalina.

Para Matias, Faria e Torres (2014), a reatividade pozolânica é influenciada pela quantidade de sílica e alumina amorfas, a temperatura e a duração do tratamento, o tamanho da distribuição de partículas e a superfície específica.

Amin, Alam e Gul (2015) ativaram termicamente a argila caulínica natural para averiguar seu possível potencial pozolânico. A ativação térmica foi realizada nas

temperaturas de 200, 400, 600 e 800°C por duas horas. Concluíram que a melhor temperatura para tratamento da argila em estudo é de 800°C, sendo permitida a substituição do cimento pelo material em até 25% em argamassas de cimento Portland.

De La Villa et al. (2017) avaliaram o efeito combinado da ativação química e térmica no resíduo de carvão, sendo o ZnO o ativador químico e o tratamento térmico realizado nas temperaturas de 550°C, 600°C e 650°C por duas horas. Os resultados mostraram que o processo foi importante no desenvolvimento do potencial pozolânico do resíduo.

Yanguatin et al. (2019) observaram as propriedades pozolânicas da argila escavada calcinada nas temperaturas de 550°C e 650°C. Os resultados indicam que as argilas com o tratamento térmico a 650°C apresenta boa atividade pozolânica e apresentam um aumento de resistência à compressão aos 28 dias de cerca de 13%.

Sánchez et al. (2020) estudaram o efeito combinado da ativação térmica com tratamento na temperatura de 600°C e 750°C por duas horas e ativação química com 1% de ZnO na reatividade pozolânica de metacaulinita. Os resultados mostraram que a calcinação à 600°C e a adição de 1% de ZnO são condições ideais para melhorar as características pozolânicas do material, sendo possível a substituição de parte do cimento pelo material tratado nos materiais cimentícios.

2.4.1. Utilização de resíduos de mineração em materiais cimentícios

Peng, Lv e Yang (2014) produziram cerâmica vítrea a partir de resíduo amorfizado do tungstênio. Para a amorfização foi aplicado um tratamento térmico à 1400°C por um período de 3 horas, sendo as amostras posteriormente trituradas e peneiradas na peneira de malha #200. Esse tratamento permitiu amorfizar toda a sílica presente na amostra de acordo com a análise de difração de raios-X após o processo.

Kiventerä et al. (2018) investigaram a estabilidade química de geopolímeros sintetizados com ativação alcalina de resíduos de escória de alto forno e de minas de ouro. Os resultados mostraram boa estabilização química dos resíduos de ouro, com alto grau de consolidação ao longo do tempo.

Bouzidi, Bouzidi e Tahakourt (2018) beneficiaram resíduos de minério de ferro com tratamento térmico à 600°C e 900°C objetivando aplicá-lo na produção de cimento

Portland. Constataram que a inclusão de 4,4 a 6,3% na composição do cimento Portland comum é possível, sem que haja a perda das propriedades essenciais do cimento.

Medeiros et al. (2019) substituíram o agregado miúdo da argamassa por resíduo da scheelita e constataram que o composto cimentício apresentavam propriedades mecânicas de acordo com os padrões normativos brasileiros.

Almeida et al. (2020) trataram o resíduo de tungstênio através de eletrodialise na presença de solventes eutéticos, seguido por tratamento térmico a temperatura entre 800°C e 950°C por 1 hora. O tratamento potencializou a reatividade pozolânica do resíduo em até 87%. Logo, concluíram que a inserção desse resíduo tratado em materiais cimentícios pode melhorar suas propriedades, além de reduzir os impactos ambientais.

Gou, Zhou e Then (2019) afirmaram que a utilização de resíduos de mineração em materiais cimentícios aumenta a sua resistência a compressão de materiais cimentícios quando aplicados como agregado miúdo, e que eles também podem oferecer ganho de resistência quando empregados em substituição parcial ao cimento, desde que sejam previamente tratados.

Outra forma de trazer melhorias nas propriedades dos materiais é através de mudanças em sua microestrutura através da redução de poros (SANTOS et al., 2018).

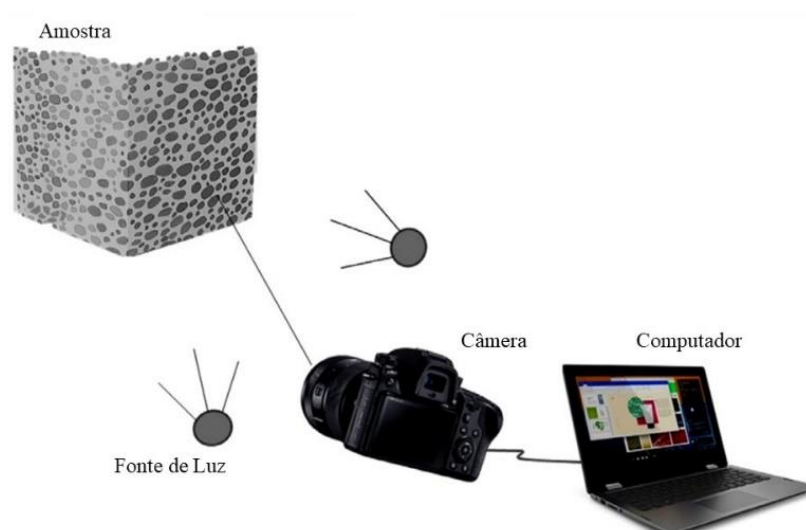
2.5. CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS

A Correlação Digital de Imagens (CDI) é um método óptico baseado na obtenção de imagens sem contato direto para medição de deformações e de campos de deslocamento. A técnica de CDI adquire imagens de um objeto em diferentes estágios (tempo, carregamento ou estado) usando dispositivos de imagens digitais, com consecutiva análise dessas imagens com o uso de algoritmos de correspondência baseados em correlação de área ou intensidade (PAN, 2018).

Com o desenvolvimento das técnicas de obtenção de imagens digital e com o avanço no processamento de dados, a CDI tem se mostrado como um método bastante útil para a determinação de parâmetros dos materiais. O método vem sendo utilizado nos estudos sobre o comportamento de tensão-deformação, tensão residual, propagação de trincas, dentre outros (QUANJIN et al., 2020).

A CDI pode ser aplicada em análises 2D e 3D. Para a utilização em 2D, é necessário o desenvolvimento de uma configuração experimental. Essa configuração envolve a utilização de dispositivos para captura das imagens, para a obtenção de dados e um para processamento destes, além de estrutura com iluminação adequada para garantia de qualidade das imagens (BELLO et al., 2021).

Figura 1: Configuração experimental para a aplicação da técnica de Correlação Digital de Imagens (2D).



Fonte: adaptado de Hassan (2021)

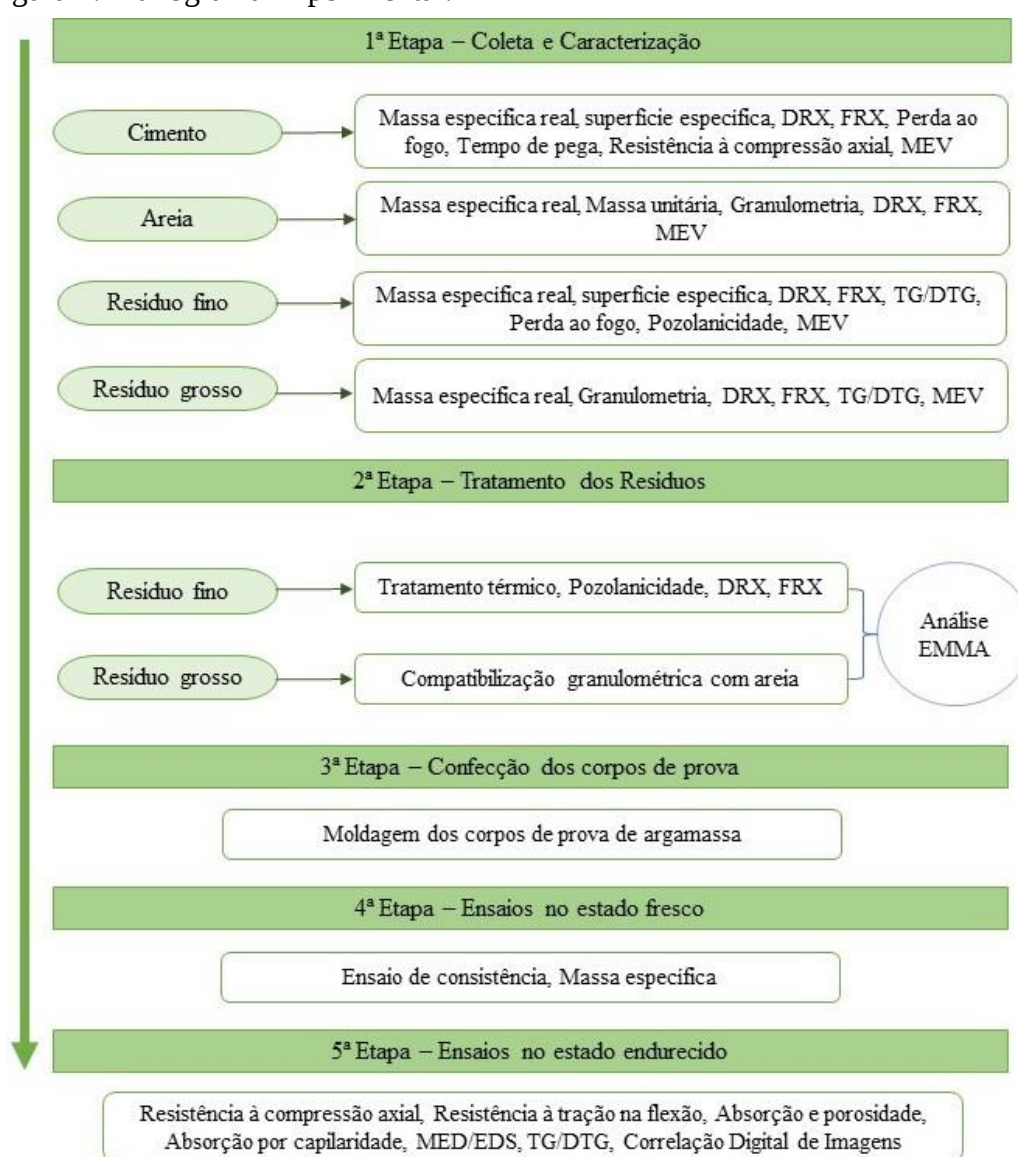
A técnica de CDI compara regiões de interesse (ROI), que subdivide a imagem em vários subconjuntos para correlacionar os presentes na imagem de referência com os apresentados nas imagens de deformações. A região de correlação varia dependendo da posição e tamanho do objeto, sendo o subconjunto determinado de acordo com o estado da amostra submetida à deformação. A correlação entre a imagem de referência e a deformada é calculada com base na similaridade em escala de cinza e, portanto, o contraste de cor entre a superfície da amostra e o padrão de textura é importante para a obtenção de resultados precisos (YOON et al., 2021).

Hild e Roux (2008) desenvolveram um algoritmo denominado CORRELI^{Q4} implementado no *Software* MATLAB, para realizar a correlação de imagens utilizando a metodologia de elementos finitos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Na presente seção são descritas cinco etapas (Figura 2) que compõem o programa experimental desta pesquisa. Inicialmente, foram caracterizados os materiais, seguidos de compatibilização granulométrica por empacotamento das partículas e beneficiamento térmico do resíduo da scheelita fino. Posteriormente, foram produzidas as argamassas para análise das propriedades e discussões dos resultados. Todos os ensaios e procedimentos foram realizados de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Figura 2: Fluxograma Experimental.



Fonte: Autor (2022).

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Cimento Portland

O cimento empregado para o desenvolvimento desta pesquisa foi o CP V ARI-RS (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, Resistente ao ataque de Sulfatos), fabricado pela empresa MIZU. A escolha desse por esse tipo de cimento deu-se pelo fato deste não conter pozolanas em sua composição química, permitindo assim melhor avaliação da influência do tratamento aplicado ao resíduo de scheelita fino para aprimoramento de suas propriedades pozolânicas. Além disso, o CP V ARI-RS é um dos cimentos mais consumidos na região.

Para a caracterização do cimento utilizou-se as seguintes normas: NBR 16605 - Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica (ABNT, 2017), NBR 11579 - Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200) (ABNT, 2013), NBR 16372 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine) (ABNT, 2015), NBR NM 18 - Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo (ABNT, 2018), NBR 16607 - Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega (ABNT, 2018), NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos (ABNT, 2018). Na Figura 3 é ilustrada a execução de algumas caracterizações.

Figura 3: Ensaios de determinação das propriedades do cimento – Determinação do tempo de pega, Determinação da massa específica real e Determinação da finura pelo método de Blaine, respectivamente.



Fonte: Autor (2022).

3.1.2. Areia natural

O agregado miúdo natural foi adquirido de jazidas da região de Mossoró. A areia passou por análise granulométrica de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e

determinação de massa específica real através da NBR NM 52 (ABNT, 2009). Ambos os ensaios estão ilustrados na Figura 4.

Figura 4: Ensaio de granulometria e massa específica da areia.



Fonte: Autor (2022).

3.1.3. Resíduo de scheelita

O resíduo de scheelita utilizado na pesquisa foi fornecido pela Mina Brejuí. Na Figura 5a) tem-se a representação da localização geográfica da mina, e na Figura 5b) a visualização por satélite, sendo possível a observação dos locais de deposição do resíduo.

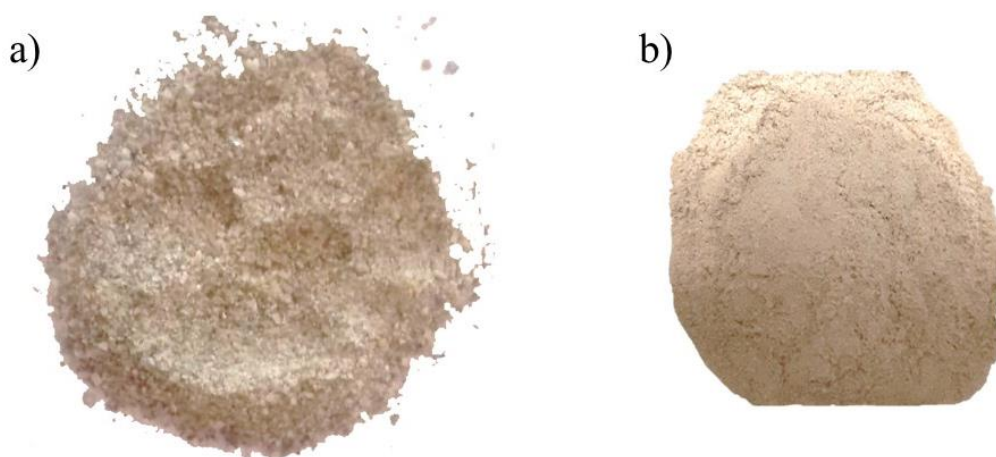
Figura 5: Imagens de satélite da Mina Brejuí.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2022).

O resíduo foi utilizado em duas granulometrias diferentes, sendo o resíduo de scheelita grosso (RSG) e o resíduo de scheelita fino (RSF). O RSG foi incorporado a composição da argamassa substituindo uma porcentagem em massa do agregado miúdo (areia), enquanto o RSF substituiu parcialmente o aglomerante (cimento). O RSG é ilustrado na Figura 6a) e o RSF na Figura 6b).

Figura 6: a) resíduo de scheelita grosso, b) resíduo de scheelita fino.

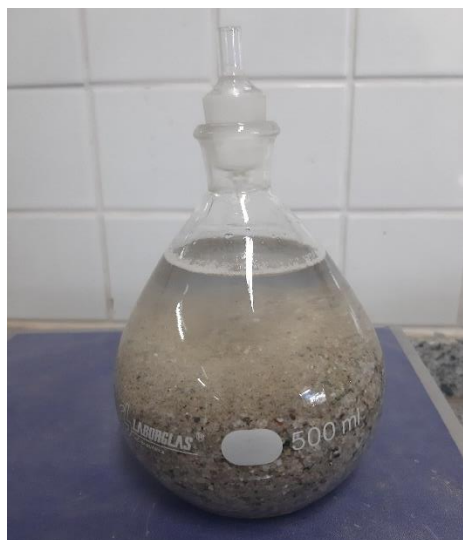


Fonte: Autor (2022).

Para o RSG realizaram-se as mesmas análises físicas feitas na areia (Figura 7). Para o RSF foi realizado o ensaio de massa específica de acordo com a NBR NM 52

(ABNT, 2009), superfície específica segundo a NBR 16372 (ABNT, 2015), perda ao fogo NBR NM 18 (ABNT, 2012), e a pozolanicidade através de dois métodos; foi utilizado o método físico de determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland estabelecido pela ABNT NBR 5752/2014 e também pelo método químico de Chapelle Modificado de acordo com a ABNT NBR 15895/2010, que se baseia na quantidade de hidróxido de cálcio fixado pela adição mineral. Algumas das caracterizações realizadas para o RSF estão representadas na Figura 8.

Figura 7: Determinação da massa específica do resíduo de scheelita grosso.



Fonte: Autor (2022).

Figura 8: Determinação da massa específica e do índice de atividade pozolânica do RSF.



Fonte: Autor (2022).

Todos os ensaios de caracterização dos materiais que seguiram as normas da ABNT foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Potiguar (UNP) – campus Mossoró. E, para todos os materiais constituintes da argamassa, também foram realizadas as caracterizações por Difração de Raios-X (DRX), Fluorescência de Raios-X (FRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Esses ensaios foram executados pelo Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis (CTGAS – ER).

3.1.4. Água

A água utilizada para a produção das argamassas foi proveniente da rede de abastecimento da cidade de Mossoró.

3.2. MÉTODOS

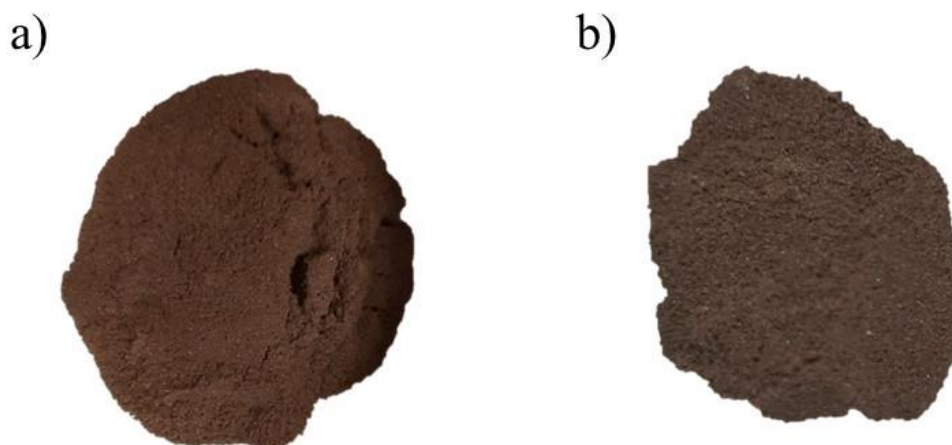
3.2.1. Tratamento do resíduo de scheelita fino

Na segunda etapa de execução do programa experimental realizou-se a ativação térmica e mecânica do RSF, sendo este passado inicialmente por tratamento térmico em temperatura de 1000 °C por uma hora. Almeida et al. (2020a) e Matias et al. (2014) verificaram efeito pozolânico positivo em tratamentos com essa temperatura e duração.

Após o tratamento térmico, o RSF foi tratado mecanicamente sendo macerado para redução de aglomerados de partículas e peneirado na peneira de abertura de 0,074 mm. Para finalizar esta etapa, verificou-se a pozolanicidade do material a fim de averiguar a possível ativação de propriedades pozolânicas; para isso aplicou-se o método estabelecido pela NBR 5752 (ABNT, 2014) e pela NBR 15895 (ABNT, 2010). Também avaliou-se a composição química e mineralógica do resíduo através de DRX e FRX.

Na Figura 9a) tem-se a representação do RSF após o tratamento térmico, e na Figura 9b) verifica-se o RSF após tratamento mecânico por peneiramento.

Figura 9: a) RSF calcinado; b) RSF calcinado e peneirado.



Fonte: Autor (2022).

3.2.2. Compatibilização granulométrica do resíduo grosso

Para a escolha da porcentagem de substituição da areia houve uma busca pelo Teor Fixado a ser Determinado (TFD) do RSG, através da compatibilização granulométrica desses materiais, considerando-se a distribuição de tamanho das partículas obtida a partir do ensaio de análise granulométrica. Esse procedimento foi adotado conforme o aplicado por MEDEIROS et al. (2021).

A curva ótima teórica foi obtida a partir da distribuição granulométrica presente na “zona ótima” estabelecida pela NBR 7211 (2009) (Tabela 1). A curva foi construída com base nos valores médios dos limites superiores e inferiores do material retido acumulado na série de peneiras, recebendo a denominação de Curva Ótima Média. Após a obtenção das curvas granulométricas da areia e do RSG, utilizou-se o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) e o módulo SOLVER do Microsoft Excel para a determinação do TDF, variando de 0 a 100% de modo que a soma dos quadrados dos erros da série de peneiras do material retido entre as curvas teóricas da mistura (areia + RSG) e a Curva Ótima Média fosse minimizado.

Tabela 1: Limites dimensionais da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)	Porcentagem retida e acumulada (em massa)			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona utilizável	Zona ótima
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Fonte: Adaptado da NBR 7211 (2009).

Para a determinação do TFD foram escolhidas as frações de areia retidas nas peneiras com abertura de 1,18 e 2,36 mm, e a passante na peneira de abertura 4,8 mm. Essas frações foram definidas com o objetivo de simular o melhor ajuste teórico de acordo com o procedimento aplicado.

3.2.3. Definição das Composições

Para a produção das argamassas adotou-se um traço de referência que apresentou proporção de massa de 1:3 (cimento e areia). A partir do traço de referência, na busca de obter argamassas com propriedades reológicas semelhantes à mistura convencional, foram dosadas três famílias de argamassa, com teor fixo de areia substituído pelo RSG, variando o teor de substituição do cimento pelo RSF tratado. Para o teor variado de substituição do cimento pelo RSF foram feitos incrementos de 5%, 10% e 20%. Jacoby e Pelisser (2015) obtiveram propriedades satisfatórias substituindo estas porcentagens de cimento por resíduo do polimento do porcelanato na produção de argamassa. A Tabela 2 descreve a nomenclatura usada para identificar os traços e suas respectivas composições.

Tabela 2: Nomenclatura dos traços produzidos.

Traço	Nomenclatura⁽¹⁾	Composição
	REF	Cimento + areia natural + água
1:3	T(%RSG)/5	Cimento + areia natural + RSG + RSF + água
(Cimento:Areia)	T(%RSG)/10	Cimento + areia natural + RSG + RSF + água
	T(%RSG)/20	Cimento + areia natural + RSG + RSF + água

⁽¹⁾ As nomenclaturas das misturas indicam: T – Traço; (%RSG)/(%RSF) – Porcentagem do RSG seguida da porcentagem do RSF.

Fonte: Autor (2022).

Em seguida, realizou-se uma análise no *software* EMMA Mix Analyzer para verificar o empacotamento de partículas e comparar o empacotamento das argamassas com substituição com a argamassa de referência, afim de averiguar se houve incrementos nesse fator. O método de cálculo utilizado para o empacotamento foi o de Andreassen Modificado, com coeficiente de empacotamento (q) igual a 0,29. De acordo com Sokolovicz (2020), o valor de “q” deve variar entre 0,25 e 0,30 para obtenção de traços com fluidez adequada.

3.2.4. Ensaio das argamassas no estado fresco e moldagem

Para a confecção das argamassas aplicou-se o método convencional em argamassadeira com capacidade de aproximadamente 5 dm³, seguindo o procedimento de mistura mecânica descrito na ABNT NBR 7215:2019 (Figura 10). Para os traços com substituição, os materiais passaram por mistura prévia, ou seja, o RSF com o cimento e o RSG com a areia, de modo a facilitar a confecção da argamassa.

Figura 10: Produção das argamassas.



Fonte: Autor (2022).

A argamassa foi produzida e, logo em seguida, realizou-se o ensaio do índice de consistência (*flow table*) de acordo com a ABNT NBR 13276:2016, com a argamassa ainda fresca, seguindo-se com o ensaio de massa específica (ABNT NBR 13278:2005) e posterior moldagem de corpos de prova. Os corpos de prova moldados (Figura 11) permaneceram em repouso por período de 24 horas e, após este período, foram desmoldados e submetidos ao processo de cura em submersão em tanque com água adicionada de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , até as idades de realização dos ensaios do estado endurecido.

Figura 11: Corpos de prova moldados após confecção das argamassas.



Fonte: Autor (2022).

Os ensaios no estado fresco e endurecido foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UNP, com exceção do ensaio de resistência à tração na flexão, que foi executado no Laboratório de Ensaios Mecânicos da UFERSA.

3.2.5. Ensaio das argamassas no estado endurecido

Para este estudo foram produzidos 96 corpos de prova, variando entre os formatos cilíndricos (com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura), cúbicos (com aresta de 10 cm) e prismáticos (com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm) de acordo com o ensaio a ser realizado. A Tabela 3 apresenta um resumo dos ensaios executados no estado endurecido e o formato de corpo de prova adotado para cada ensaio, e a Figura 12 ilustra os diferentes formatos dos corpos de prova moldados.

Tabela 3: Quantitativo e formato de corpos de prova por ensaio.

Ensaio	NBR	Amostra	Formato
Resistência à compressão	NBR 13279/2005	3	Cúbico
Resistência à tração na flexão	NBR 13279/2006	3	Prismático
Absorção e porosidade	NBR 9778/2005	3	Cilíndrico
Absorção por capilaridade	NBR 9779/2012	3	Cilíndrico

Fonte: Autor (2022).

Figura 12: Formato dos corpos de prova; a) cilíndrico, b) cúbico, c) prismático.



Fonte: Autor (2022).

Esta etapa foi realizada nas idades de 28 e 120 dias de cura dos corpos de prova. Além dos ensaios normativos acima citados, as argamassas também passaram por análise de MEV em ambas as idades e por análise termogravimétrica para a idade de 120 dias. Após a obtenção dos resultados dos ensaios físicos e mecânicos, os dados foram organizados, tratados e analisados estatisticamente com a aplicação da Análise de Variância (ANOVA), seguida pela comparação entre médias pelo Teste de Tukey com 95% de confiança. Essas análises foram realizadas no *software* SISVAR.

3.2.6. Correlação Digital de Imagens

Os ensaios de determinação da resistência à tração na flexão aos 28 dias foram acompanhados da execução da técnica de CDI, afim de obter as deformações e os campos de deslocamento das argamassas.

De acordo com Pan (2018), os procedimentos para a implementação da técnica de CDI compreendem essencialmente três passos consecutivos, conforme apresentado a seguir:

- 1- Texturização da superfície do corpo de prova: a superfície da amostra de ensaio deve ter variações aleatórias de intensidade, formando um padrão de alto contraste. Dessa forma, a superfície deve ser limpa e pigmentada.

- 2- Aquisição de imagens digitais: as imagens das superfícies das amostras de teste são obtidas com o auxílio de uma câmera fotográfica, fazendo-se o registro antes do carregamento (imagem de referência) para a definição dos parâmetros e durante a aplicação da carga para processamento.
- 3- Cálculos dos deslocamentos e deformações: a imagem de referência é comparada com as demais imagens da amostra com o auxílio de algoritmos computacionais, obtendo-se os campos cinemáticos desejados.

Desse modo, inicialmente houve a preparação das superfícies dos corpos de prova com a realização da texturização através do uso de tinta spray preta e branca (Figura 13).

Figura 13: Corpo de prova texturizado.



Fonte: Autor (2022).

Após o preparo da superfície dos corpos de prova, montou-se a estrutura para realização dos ensaios. Começando pelo posicionamento do tripé da câmera digital, com altura e distância até a prensa reguladas de forma a permitir a visualização completa do corpo de prova. A câmera utilizada foi da marca CANON, modelo EOS 60D. Por meio do *software* EOS Utility foi programada a captura de fotos a cada cinco segundos. Na Figura 14 é possível observar os equipamentos utilizados durante o ensaio.

Figura 14: Estrutura para a execução da CDI.



Fonte: Autor (2022).

Após a captação das imagens, faz-se a correlação destas com o auxílio do *software* MATLAB, executando-se a rotina *Correli*^{Q4}, que mede os campos de deslocamento e deformações a partir de comparações entre as imagens. O início do processo de análise das imagens é feito com o corte destas, em tamanho apropriado. Os cortes são realizados para retirar das imagens partes que não necessitam de análise, mantendo-se apenas a região do corpo de prova.

Realizados os cortes, é feita a seleção da imagem de referência, representando o início do ensaio e, conseqüentemente, o corpo de prova sem formação. Em seguida, é selecionada a função *Texture* do programa *Correli*^{Q4}, esse passo permite a análise dos níveis de cinza (textura) presentes na imagem de referência, contribuindo para a escolha do tamanho ideal da zona de interesse (ZOI). Com a determinação da ZOI de análise, utiliza-se a função *Computacion Click* para realizar o processo de comparação entre as imagens.

Adiante, faz-se a seleção da região de interesse (ROI), selecionando dentro da imagem de referência cortada, a região que será propriamente analisada. A partir desse passo é necessário determinar os parâmetros de análise, como o tamanho da ZOI, a transição entre duas regiões vizinhas (*ZOI Shift*), o número de interações que serão realizadas e a quantidade de imagens para análise. Na presente pesquisa foi escolhido o tamanho de 64 *pixels* para a ZOI e *ZOI Shift*, com cinco interações. Com a execução dos comandos, a análise das imagens é realizada e armazenada.

O arquivo salvo da etapa anterior é analisado através da função *Vizualization* também do programa Correli^{Q4}. A partir desse comando é possível observar em escalas coloridas os campos de deslocamento e deformações, tanto no sentido longitudinal quanto no transversal, de todas as imagens. Ainda é possível a utilização do comando *Gauge*, que expressa de forma numérica as deformações longitudinais e transversais de uma determinada zona, escolhida pelo usuário. Com essas informações numéricas de deformações e os dados de tensão fornecidos pela máquina universal de ensaios (prensa), é possível o desenvolvimento de um diagrama tensão x deformação, inferindo-se sobre as propriedades mecânicas dos materiais avaliados.

Com base na execução do fluxograma experimental desta pesquisa e nos resultados obtidos, foi então possível aferir se o resíduo de scheelita, tanto o fino como o grosso, promove alterações nas propriedades químicas, físicas e mecânicas das argamassas, bem como pôde-se estimar a porcentagem ideal de substituição do cimento por resíduo termicamente tratado, sem que se perdessem as propriedades essenciais das argamassas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

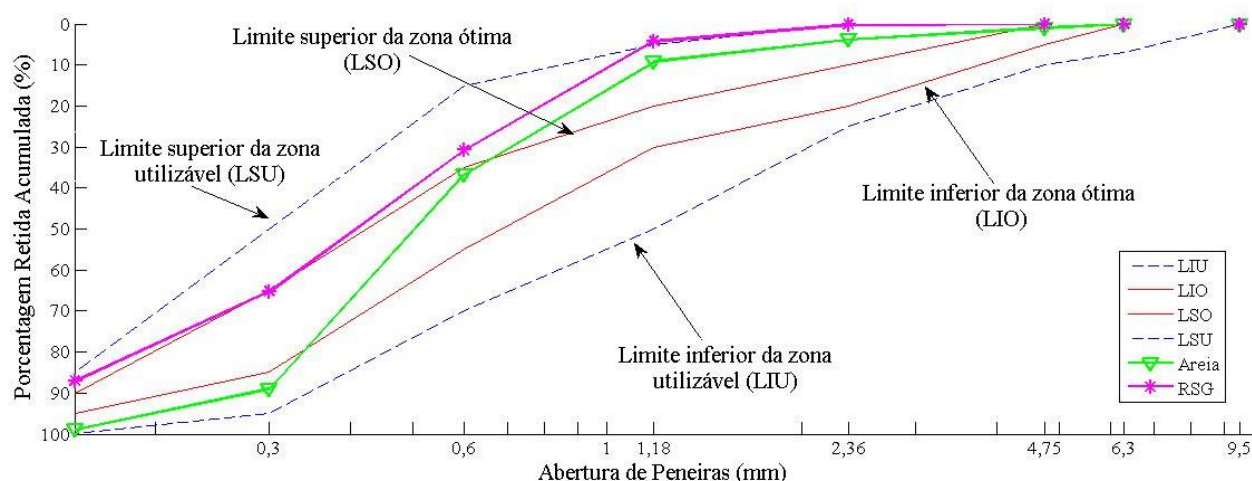
Nesta seção são abordados resultados da pesquisa, iniciando-se pela caracterização dos materiais empregados na produção das argamassas, incluindo-se as análises químicas, físicas, mineralógicas e microestruturais. Em seguida, tem-se as avaliações das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido, observando-se a influência das substituições nestas propriedades.

4.1. AREIA E RESÍDUO DE SCHEELITA GROSSO

Os resultados referentes a caracterização da areia e do RSG são abordados em conjunto a fim de compará-los, haja vista que ambos serão empregados juntos como agregado miúdo na mistura da argamassa com substituição.

Tratando-se da distribuição granulométrica da areia (Figura 15), verifica-se que o material ensaiado se encontra ligeiramente dentro da zona ótima estabelecida pela NBR 7211 (2009). Na Tabela 4, pode-se verificar que o seu módulo de finura é de 2,38, estando dentro da variação do módulo de finura de ser classificada como areia média, também de acordo com a NBR 7211 (2009).

Figura 15: Curvas granulométricas da areia e do RSG.



Fonte: Autor (2022).

Com relação ao RSG, a Figura 15 apresenta sua distribuição granulométrica, sendo possível a constatação de que o material é mais fino do que a areia, não encaixando-

se na zona ótima em nenhuma faixa de peneiramento. Essa afirmação pode ser confirmada ao analisar o módulo de finura do RSG (Tabela 4) que foi de 1,87, estando este dentro da zona utilizável inferior, que varia de 1,55 a 2,20, segundo a NBR 7211 (2009).

Tabela 4: Propriedades físicas da areia e do RSG.

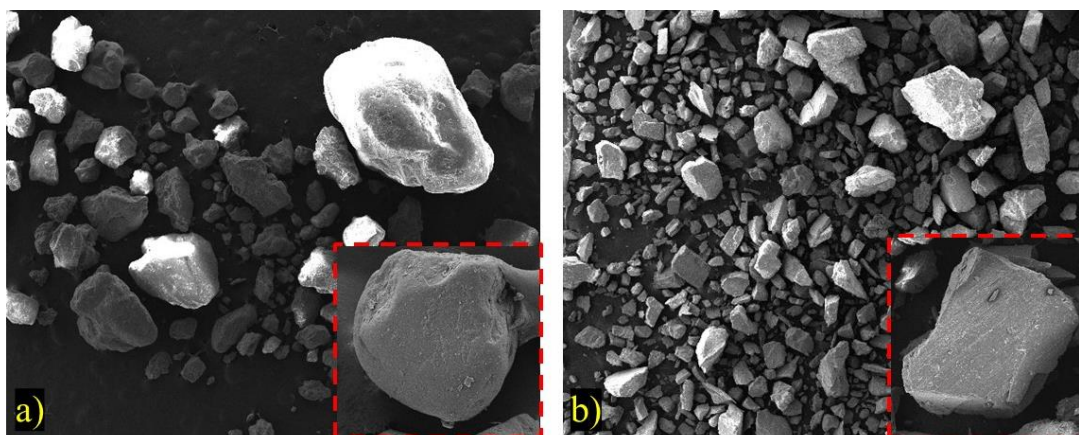
Propriedades	Agregados	
	Areia	RSG
Módulo de finura	2,38	1,87
Massa específica real (g/cm ³)	2,61	2,86
Massa unitária (g/cm ³)	1,48	1,59

Fonte: Autor (2022).

As massas unitária e específica do RSG são maiores que as da areia, sendo a massa específica do RSG aproximadamente 10% maior do que a massa do agregado natural miúdo. Tais resultados corroboram com as análises realizadas por Nascimento et al. (2021), que verificou a semelhança granulométrica entre o resíduo grosso da scheelita e a areia natural, com o RSG apresentando partículas mais finas e de maior massa específica, resultando em um produto final mais pesado.

Com relação a forma das partículas, a areia apresenta formatos arredondados e uniformes, enquanto o RSG possui formato de lâmina e sem uniformidade, apresentando partículas mais angulares. A Figura 16a e 16b apresenta os MEVs da areia e do RSG, respectivamente, estando estes com ampliações de 30 e 300x.

Figura 16: MEVs das partículas. a) areia, b) RSG.



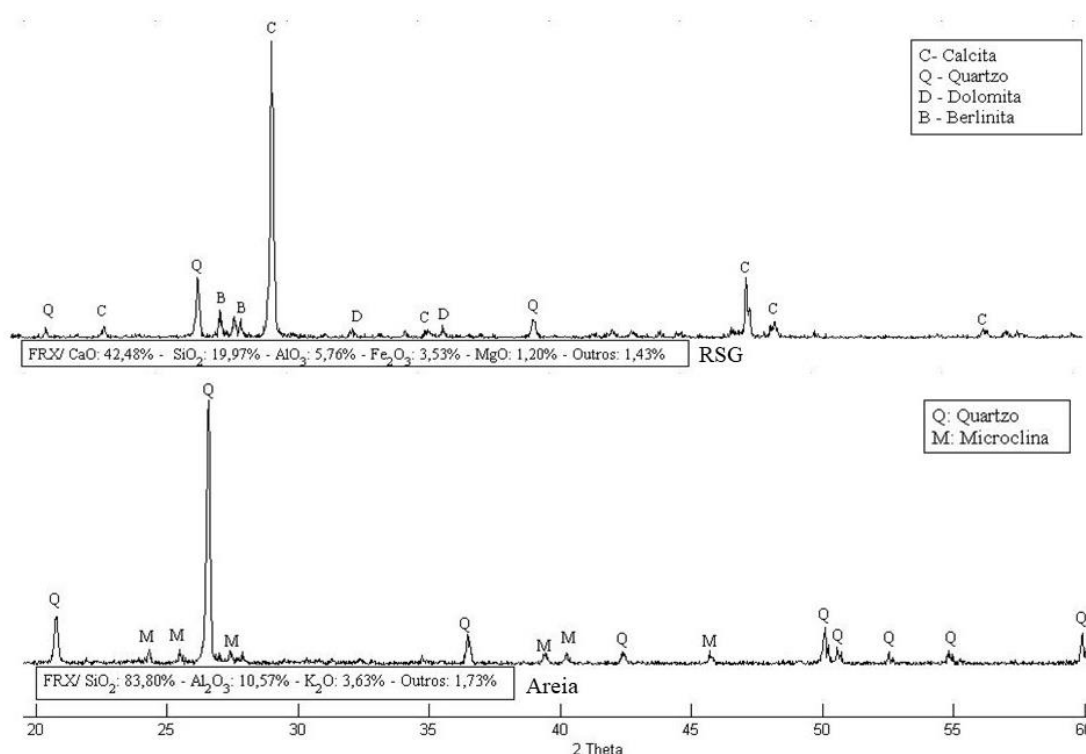
Fonte: Autor (2022).

Esses resultados demonstram estar de acordo com os estudos morfológicos realizados por Yin et al. (2020), que indicaram que os grãos de scheelita possuem formato diferente, apresentando formas laminares e cúbicas, com bordas bem definidas e superfície mais porosa do que a areia normal.

As análises químicas (FRX) e mineralógicas (DRX) dos agregados são ilustradas na Figura 17. A partir dela é possível observar que a areia apresenta picos de quartzo em quase toda a sua estrutura cristalina, corroborando com a análise química que apontou 83,80% da sua composição como sendo desse componente (SiO_2). O RSG apresenta elevado teor de cálcio (42,48%) e de sílica (19,97%), apresentando ainda outros teores de impurezas em sua composição química.

Neta et al. (2021) também constataram a mesma composição química e mineralógica no resíduo de scheelita que foi utilizado como agregado para a produção de argamassa cimentícia. Nesse estudo verificou-se que o resíduo apresentava 38,46% de CaO e 21,76% SiO_2 , semelhante ao resíduo utilizado nesta pesquisa.

Figura 17: DRX/FRX da areia e do RSG.

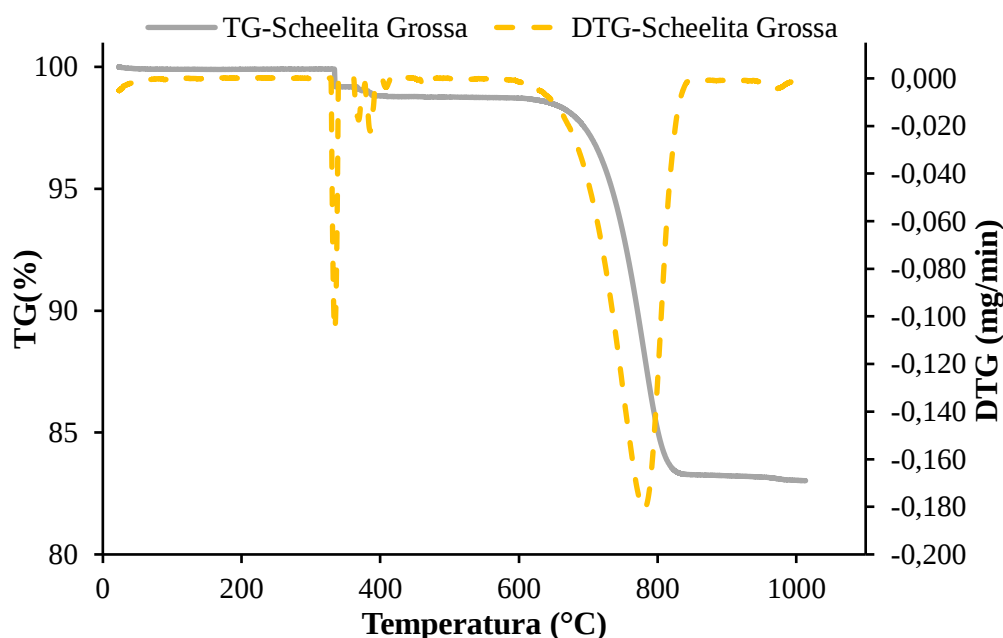


Fonte: Autor (2022).

Ainda sobre o RSG, foram realizadas análises de Termogravimetria/Diferencial de Termogravimetria (TG/DTG). A Figura 18 ilustra as curvas obtidas a partir dessa caracterização. A partir de sua interpretação é possível aferir o pico de perda de massa se deu se forma mais acentuada em torno da temperatura de 700°C, correspondendo a decomposição dos óxidos (CaO, SiO₂, AlO₃, Fe₂O₃, dentre outros) e da calcita que compõe quimicamente o material, conforme aponta FRX presente na Figura 17. Esse resultado é compatível com o estudo realizado por Carlos (2018), que identificou comportamento termogravimétrico semelhante do resíduo de scheelita.

A presente análise de TG/DTG para o RSG utilizado neste trabalho apresenta uma peculiaridade com relação ao pico existente em torno de 325°C. Esse pico pode ser proveniente da perda de massa de materiais orgânicos e impurezas não comuns de à composição química do resíduo, considerando-se que o armazenamento do resíduo é feito em pilhas sobre o solo. Essa presença diferenciada de materiais pode ser associada a forma como o resíduo é disposto em seu armazenamento na mina Brejuí.

Figura 18: Análise de TG/DTG do resíduo de scheelita grosso.



Fonte: Autor (2022).

4.2. CIMENTO E RESÍDUO DE SCHEELITA FINO

Os resultados de caracterização das propriedades do cimento CP V ARI RS são apresentados na Tabela 5. A partir dela, verifica-se que o cimento está em conformidade com os requisitos exigidos pela NBR 16697 (2018).

Tabela 5: Propriedades do cimento.

Propriedades do Cimento CP V ARI RS	
Tempo de início de pega (h)	1,36
Fim de pega (h)	2,22
Finura do cimento (%)	1,32
Resistência à compressão aos 1, 3 e 7 dias (MPa)	16,04 - 24,15 - 34,60
Massa específica real (g/cm ³)	3,05
Massa unitária (g/cm ³)	1,10
Superfície específica (cm ² /g)	5121,00
Perda ao fogo (%)	4,59

Fonte: Autor (2022).

Comparando-se o resultado de massa específica apresentado pelo cimento CP CPV ARI RS (Tabela 5) e a massa específica do RSF (Tabela 6), constata-se que o cimento possui maior massa específica do que o RSF.

Tabela 6: Propriedades do RSF.

Propriedades do Resíduo de Scheelita Fino	
Massa Específica real (g/cm ³)	2,88

Fonte: Autor (2022).

A partir da Tabela 7 é possível observar que o cimento CP V ARI RS possui granulometria mais fina do que o RSF, sendo o diâmetro médio do cimento cerca de 75% inferior ao diâmetro do RSF.

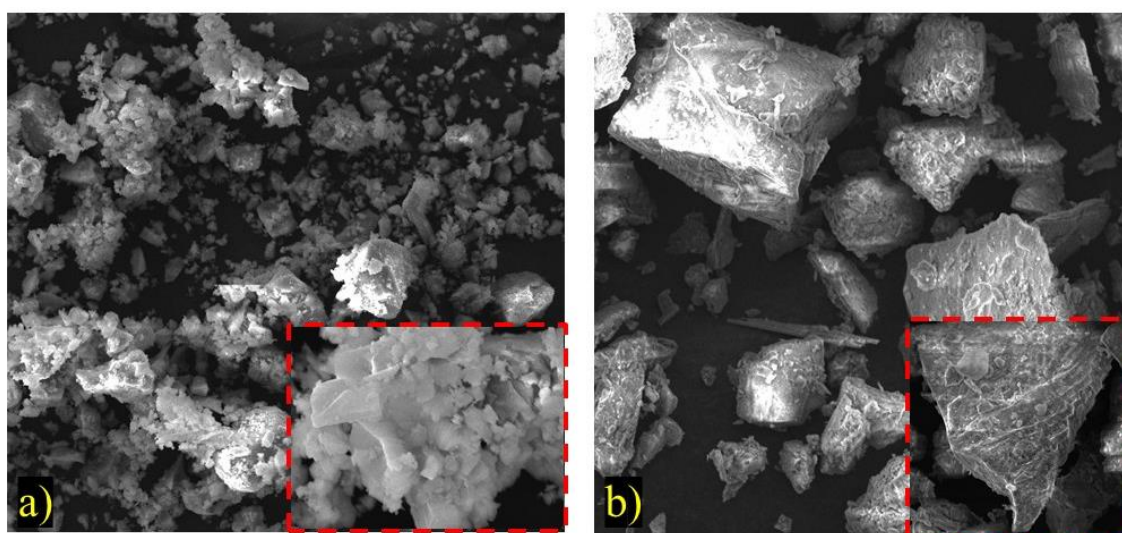
Tabela 7: Tamanho das partículas do cimento e do RSF.

Propriedades	Materiais	
	Cimento CP V ARI RS	RSF
Diâmetro médio (μm)	11,22	42,77
D_{10} , D_{50} , D_{90} (μm)	0,37 - 6,32 - 29,89	4,36 – 41,86 – 78,49

Fonte: Autor (2022).

As Figuras 19a e 19b ilustram os MEVs do cimento e do RSF, respectivamente. A partir delas observa-se que as partículas do cimento são mais aglutinadas, enquanto as partículas do RSF são mais dispersas, com formato laminar semelhante ao RSG. Os aumentos nas amostras são de 1000 e 5000x.

Figura 19: MEVs das partículas. a) cimento, b) RSF.

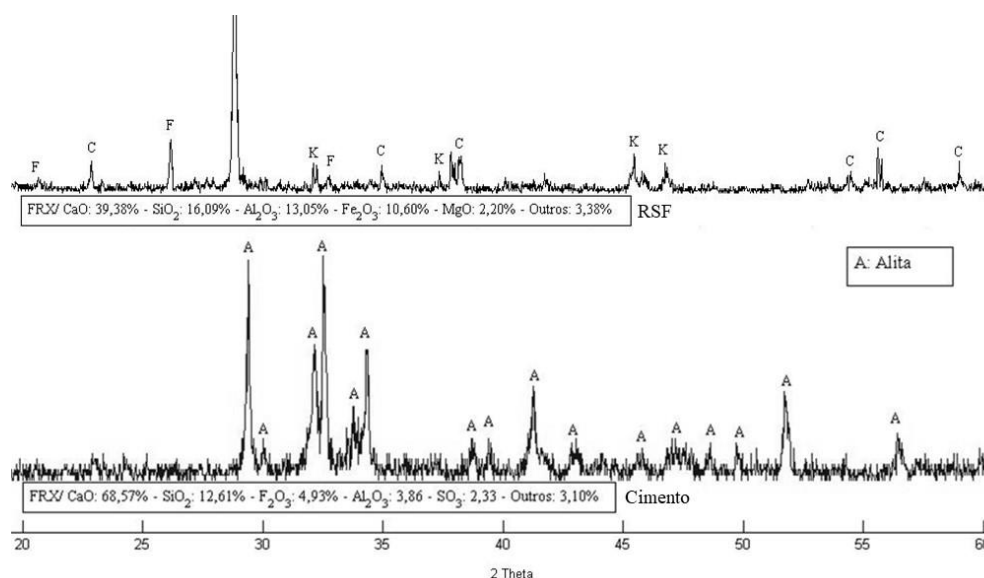


Fonte: Autor (2022).

Gondim et al. (2022) também constatarem a semelhança morfológica, química e mineralógica entre o RSG e o RSF.

Na Figura 20, nota-se que a composição química do cimento CP V ARI RS é em sua maior parte de cálcio e sílica, apresentando picos de alita (3CaSiO_2). O RSF também apresenta elevados teores de cálcio e sílica, mas em menores proporções do que o cimento, constando-se ainda outros elementos como alumínio e ferro.

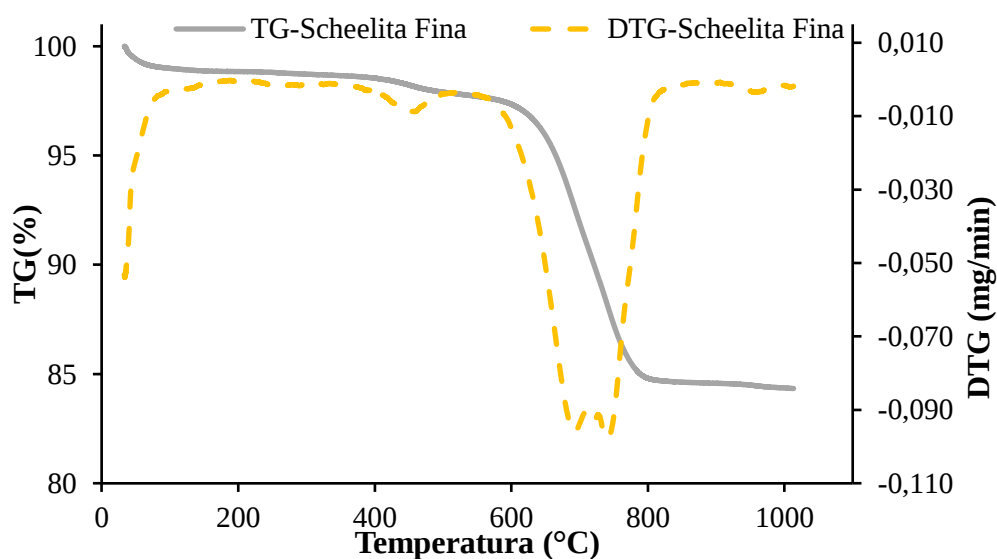
Figura 20: DRX/FRX do cimento e do RSF.



Fonte: Autor (2022).

Além do RSG, o RSF também passou por análise de termogravimetria. A Figura 21 representa as curvas TG/DTG desse material. É perceptível que o RSF apresenta o comportamento termogravimétrico semelhante do RSG, fato esse já esperado devido a semelhança na composição química dos resíduos.

Figura 21: Análise da TG/DTG do resíduo de scheelita fino.



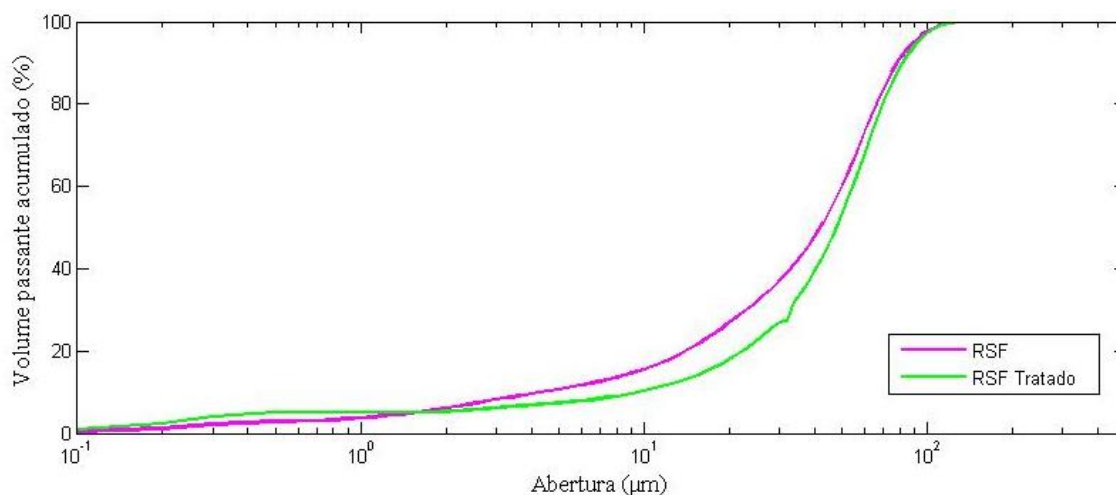
Fonte: Autor (2022).

4.2.1. Resíduo de scheelita fino tratado

Após a realização do tratamento térmico (calcinação) e mecânico (peneiramento) no RSF, sua granulométrica, composição química e mineralógica foram novamente analisadas, buscando-se identificar as influências dos tratamentos nas propriedades do material.

Com base na análise granulométrica a laser, observou-se que o resíduo após o tratamento térmico apresentou partículas com dimensões superiores ao resíduo sem tratamento, mesmo passando por peneiramento após a calcinação. Tal comportamento pode ser justificado devido a agregação das partículas ocorrida com o tratamento térmico. Na Figura 22 é possível observar a curva granulométrica de ambos os resíduos.

Figura 22: Curva granulométrica do resíduo de scheelita fino natural e tratado.



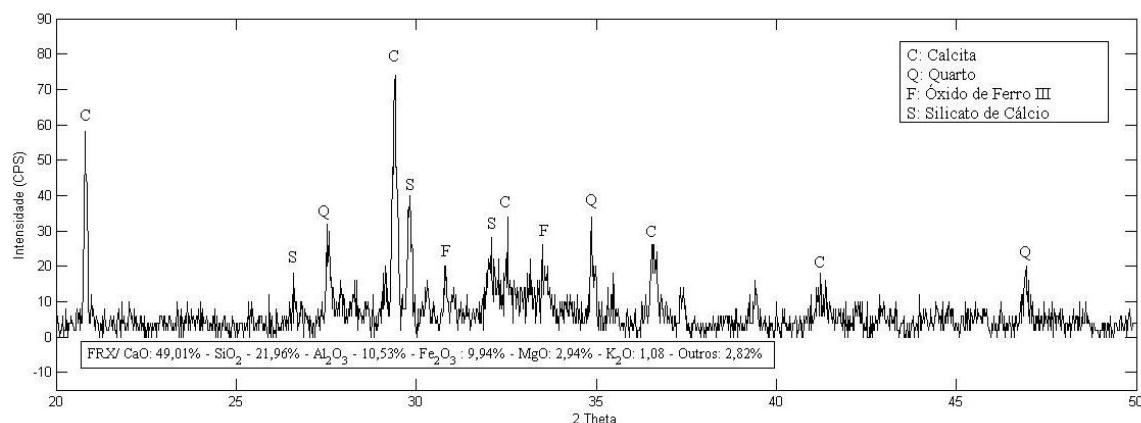
Fonte: Autor (2022).

Após os tratamentos, a composição granulométrica do RSF apresentou diâmetro médio das partículas de 47,24 μm, com 10% das partículas inferiores a 9,55 μm.

Apesar da caracterização por DRX não ter sido quantitativa a respeito das fases cristalinas e amorfas, através da análise qualitativa é possível associá-la ao FRX, conforme Figura 23. A partir desta pode-se constatar que houve incremento na porcentagem de calcita presente na amostra após o tratamento térmico, bem como aumento de quartzo. No RSF sem tratamento, a composição química constituía-se em

39,38% de CaO, enquanto após o tratamento o RSF apresentou 49,01% de CaO, representando um aumento de 23% do mineral.

Figura 23: DRX/FRX do resíduo de scheelita fino tratado.



Fonte: Autor (2022).

Tal resultado corrobora com os encontrados por Peng, Yang e Ouyang (2015), que também constataram diferenças na composição química e mineralógica do resíduo de scheelita após processo de calcinação. De acordo com os autores, após o tratamento térmico foi possível observar a amorfização da estrutura do resíduo.

Com relação ao índice de atividade pozolânica do RSF, nas Tabelas 8 e 9 nota-se que houve melhorias neste índice quando se compara o material natural e o material tratado após calcinação e peneiramento.

O índice de atividade pelo Método de Chapelle Modificado (Tabela 7) apresentou incremento de aproximadamente 5x do RSF natural para o RSF calcinado. Entretanto, mesmo com esse aumento considerável, o RSF calcinado ainda é inferior a 436 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de adição, não podendo ser classificado como um material pozolânico de acordo com Raverdy *et al.* em 1980 (RÊGO, 2015 *apud* SALUM, 2016).

Tabela 8: Índice de atividade pozolânica pelo Método de Chapelle Modificado.

IAP - Chapelle Modificado	
Natural	62,83
Peneirado	144,14
Calcinado	303,07

Fonte: Autor (2022).

Tratando-se do índice de atividade pozolânica de acordo com a NBR 5752/2014, também se nota que, embora o RSF tenha apresentado melhorias no índice após o tratamento, este ainda se encontra inferior a 75%, não sendo caracterizado como material pozolânico.

Tabela 9: Índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias.

IAP - ABNT NBR 5752	
Natural	48%
Peneirado	62%
Calcinado	72%

Fonte: Autor (2022).

Na pesquisa realizada por Almeida et al. (2020b) também foi possível incrementar a atividade pozolânica do resíduo de scheelita através do tratamento térmico e mecânico, embora também não tenha sido possível alcançar o valor mínimo do índice para ser classificado como um material pozolânico. Os autores ressaltam a importância desse incremento pozolânico para a durabilidade dos materiais cimentícios.

4.3. COMPATIBILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

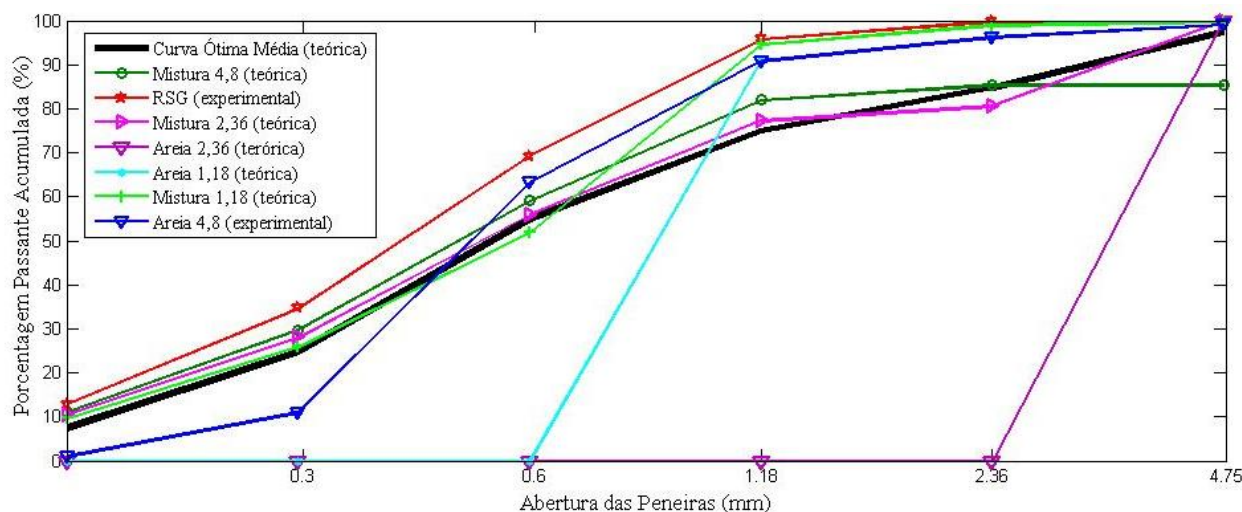
De acordo com as curvas granulométricas ilustradas na Figura 15, constatou-se que a areia e o RSG estão fora dos limites da zona ótima para aplicação como agregado miúdo, segundo critérios da NBR 7211 (2009). A partir disso, objetivou-se obter uma mistura otimizada que se enquadrasse na zona ótima. Para isso, traçou-se Curva Ótima Média (COM) teórica, resultante das médias entre os limites inferiores e superiores estabelecidos pela NBR 7211 (2009). Dessa forma, buscou-se que a curva da mistura otimizada apresentasse o menor somatório dos quadrados dos erros com relação a COM.

Para a obtenção da mistura otimizada, utilizou-se as porções de areia retidas nas peneiras de malha 1,18, 2,36 e passante na 4,8 mm para serem misturadas com o RSG.

Na Figura 24 pode-se observar graficamente que a curva que apresentou maior proximidade com a COM foi a proveniente da mistura teórica entre o RSG e a porção de areia retida na peneira de abertura de 2,36. Confirmando-se essa observação gráfica, a

curva da Mistura 2,36 teve o menor erro, sendo este de 0,002. Para essa Mistura 2,36, o TFD foi de 81% de RSG e 19% de areia retida na peneira 2,36. Dessa forma, esse foi o teor utilizado na produção de argamassa com substituição desta pesquisa.

Figura 24: Curvas granulométricas das composições.



Fonte: Autor (2022).

Medeiros et al. (2021) aplicou o mesmo método e encontrou porcentagens similares de mistura entre o RSG e a areia; eles ressaltam que a mistura entre a porção grossa da areia retida na peneira 2,36 e o material de granulometria mais fina presente no RSG resultam em uma curva que se enquadra na zona ótima estabelecida pela NBR 7211 (2009).

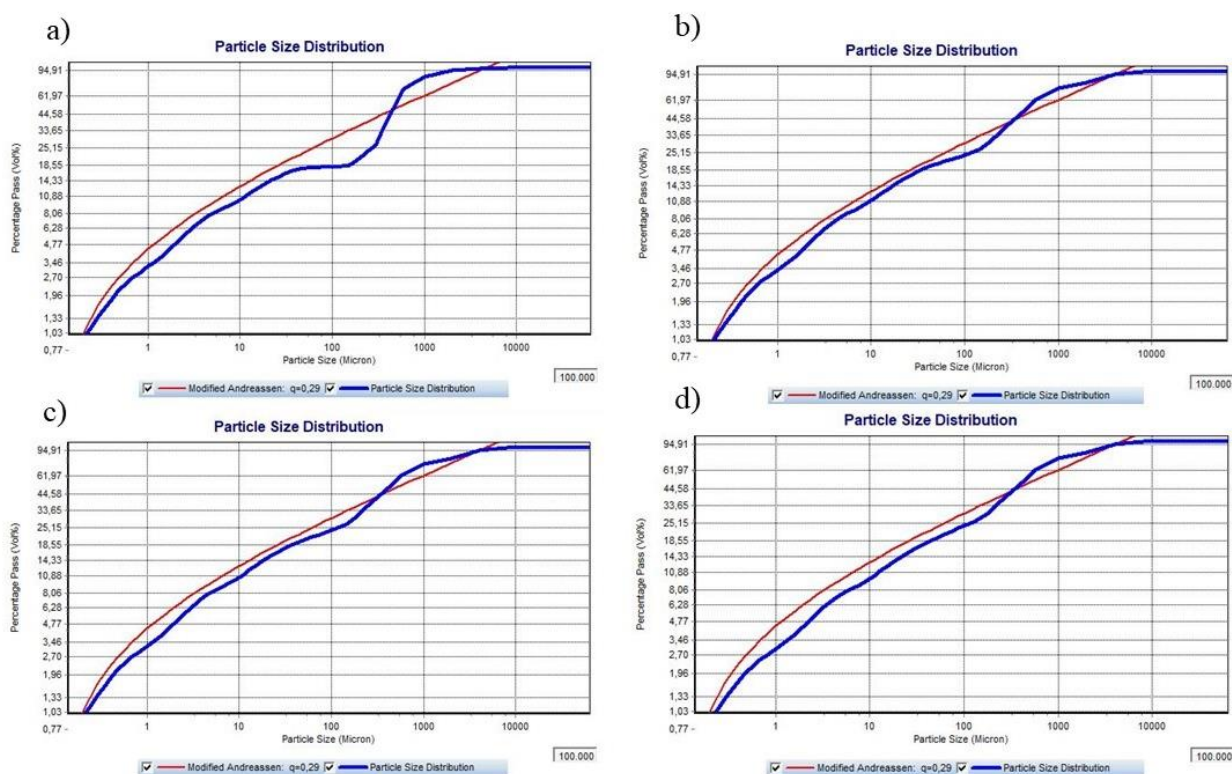
4.3.1. Empacotamento das Partículas

Após a definição da composição dos traços com substituição, analisou-se o empacotamento das partículas a fim de se determinar qual das misturas possuía maior compacidade. Para isso, foi utilizado o *software* de simulação computacional EMMA. A partir da composição granulométrica dos materiais constituintes da argamassa, o EMMA representa graficamente uma distribuição granulométrica ideal e a distribuição resultante do traço estudado, conforme ilustrado na Figura 25.

No eixo Y tem-se a analogia à porcentagem granulométrica passante do material e no eixo X, os tamanhos de partículas constituintes. A linha vermelha representa a

distribuição granulométrica ideal, proveniente do método de Andreassen Modificado, enquanto a linha azul mostra a distribuição granulométrica encontrada no traço.

Figura 25: Curvas de empacotamento das composições.



Fonte: Autor (2022).

Na Figura 25a tem-se a curva granulométrica do traço referência estudado; para a Figura 25b, Figura 25c e Figura 25d, tem-se a curva do traço T81%/5, T81%/10 e T81%/20, respectivamente. Conforme pode ser observado nas curvas, o traço T81%/5 foi o que apresentou melhor ajuste com a distribuição ideal sugerida pelo software sendo consequentemente a mistura com maior fator de empacotamento.

Também pode-se observar que, comparando-se o traço referência com os demais, como o RSF possui granulometria superior à do cimento, quanto maior a substituição do cimento pelo RSF, maior o distanciamento da curva ideal para a curva real ao se tratar das partículas inferiores a 10 μm . Enquanto para as partículas maiores que 10 μm a relação é inversa, ou seja, para uma maior quantidade de RSG substituindo a areia, ao comparar o traço referência com cada traço com substituição, tem-se uma aproximação

da curva ideal com a real. Tal fato pode ser associado ao TFD determinado para a substituição da areia pelo RSG, que definiu a melhor proporção de mistura entre os dois materiais para se enquadrar na faixa ótima de distribuição granulométrica.

4.4. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

4.4.1. Índice de consistência e massa específica

A Tabela 10 mostra os resultados obtidos no ensaio de índice de consistência das argamassas confeccionadas neste estudo.

Tabela 10: Propriedades das argamassas no estado fresco.

Argamassa	Índice de Consistência médio (mm)	Densidade de massa (kg/m ³)
REF	160	2165
T81%/5	185	2325
T81%/10	189	2390
T81%/20	190	2510

Fonte: Autor (2022).

Conforme resultados, verifica-se que a substituição do cimento pelo RSF e da areia pelo RSG promoveram aumento no índice de consistência, considerando-se que as argamassas apresentam a mesma relação água/sólidos. Tais resultados podem ser justificados pelo fato de que o RSF possui menor superfície específica do que o cimento, reduzindo o consumo de água para uma mesma consistência. Além disso, argamassas com a adição de resíduo de scheelita apresentam maior plasticidade e fluidez devido à presença do CaO em sua composição química, conforme aponta Souza et al. (2019).

Comparando-se a massa específica da argamassa de referência com as das argamassas com substituição constata-se que há aumento na densidade de massa nas argamassas com resíduo de scheelita. Esse resultado é reflexo da diferença de massa específica existente entre o RSG e a areia, sendo a massa específica do RSG superior à da areia. Medeiros et al. (2019, 2021) observaram o mesmo comportamento de aumento

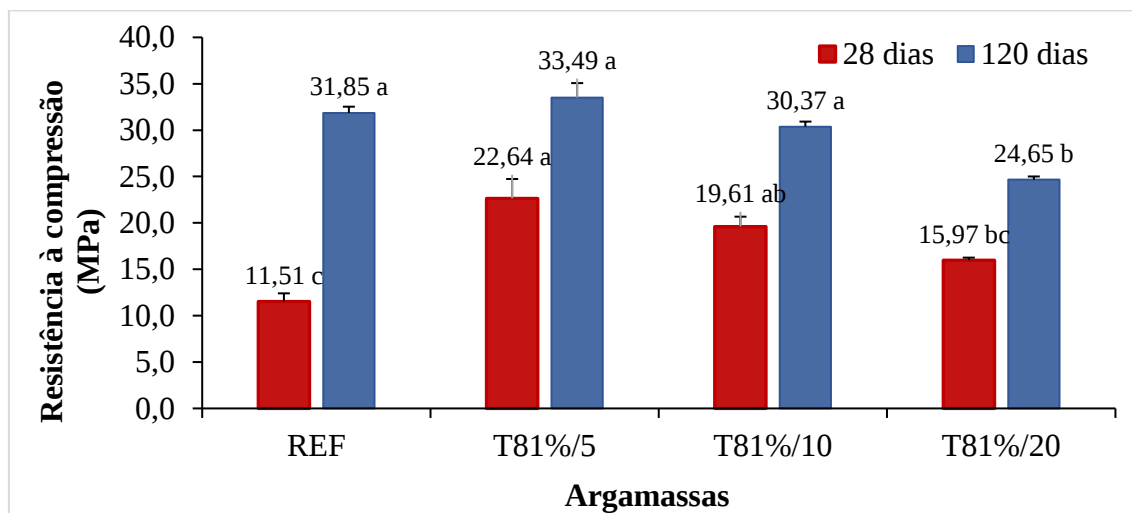
de massa específica na argamassa e no concreto, respectivamente, com a substituição da areia pelo resíduo de scheelita.

4.5. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

4.5.1. Resistência à compressão axial

A Figura 26 ilustra os resultados do ensaio de resistência à compressão axial realizado aos 28 e 120 dias de cura. Aos 28 dias, como esperava-se, a argamassa com maior resistência à compressão foi a T81%/5 com 22,62 MPa. Esse resultado era esperado pelo fato de o empacotamento desse traço ter sido o maior, o que influencia diretamente nas propriedades mecânicas do material. A resistência do T81%/5 foi aproximadamente 97% superior à do traço tomado como referência, que foi de 11,51 MPa. De acordo com o Teste de Tukey 5%, pode-se afirmar que há diferença entre médias do traço REF e T81%/5. Ainda é possível observar que a resistência do traço T81%/10 e T81%/20 também foram superiores à da referência.

Figura 26: Resistência à compressão axial aos 28 e 120 dias com teste comparativo de Tukey 5%.



Fonte: Autor (2022).

Com a idade de 120 dias, a argamassa de traço T81%/5 também foi a que apresentou maior resistência à compressão (33,49 MPa), sendo nesta idade 5% superior

a resistência da argamassa referência (31,85%). Os traços T81%/10 e T81%/20 obtiveram resistências inferiores à referência, sendo estas de 30,37 MPa e 24,65 MPa, respectivamente. Entretanto, em termos estatísticos, não houve variação significativa entre os traços REF, T81%/5 e T81%/10, com 95% de confiança pelo Teste de Tukey.

Oliveira et al. (2018) estudaram o efeito do empacotamento em concretos de alto desempenho e suas análises indicaram aumento na resistência à compressão axial dos concretos com melhor empacotamento, aos 28 dias de idade. Os autores atribuem os resultados à presença de melhor distribuição granulométrica, reduzindo a porosidade e aumentando o seu desempenho mecânico.

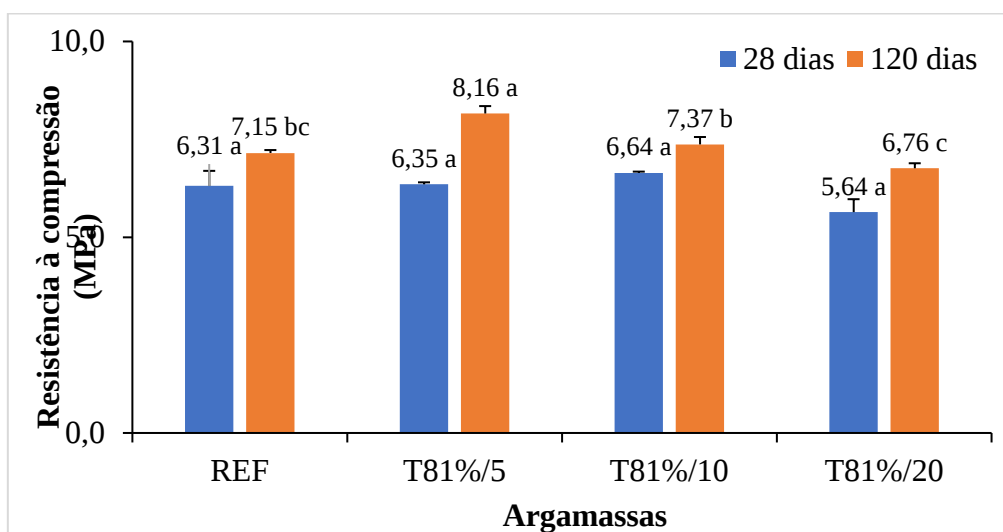
Chen et al. (2020) substituíram parcialmente a areia por resíduo de polimento do granito em argamassas de cimento Portland e constataram melhoria no empacotamento das partículas, bem como aumento de 30% a 70% na resistência à compressão das argamassas.

4.5.2. Resistência à tração na flexão

Os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão, aos 7 e 28 dias, estão expressos na Figura 27. Para os 28 dias de cura, a resistência à tração na flexão para a argamassa referência e para a T81%/5 foi semelhante, sendo estas de 6,31 e 6,35 MPa, respectivamente. Enquanto o traço T81%/10 obteve a maior resistência, sendo essa de 6,64 MPa. E a argamassa T81%/20 resultou em 5,64 MPa. Estatisticamente, de acordo com o Teste de Tukey a 5%, pode-se afirmar que não houve variação significativa entre as resistências dos quatro traços estudados.

Aos 120 dias, o traço T81%/5 obteve resistência de 8,16 MPa, sendo cerca de 14% superior a resistência do traço referência (7,15 MPa). A resistência do T81%/10 foi de 7,37 MPa e do T81%/20 foi de 6,76 MPa. Houve variação estatística significativa entre as resistências dos traços T81%/5, T81%/10 e T81%/20, porém, o traço REF apresentou interação com os traços T81%/10 e T81%/20.

Figura 27: Resistência à tração na flexão aos 28 e 120 dias.



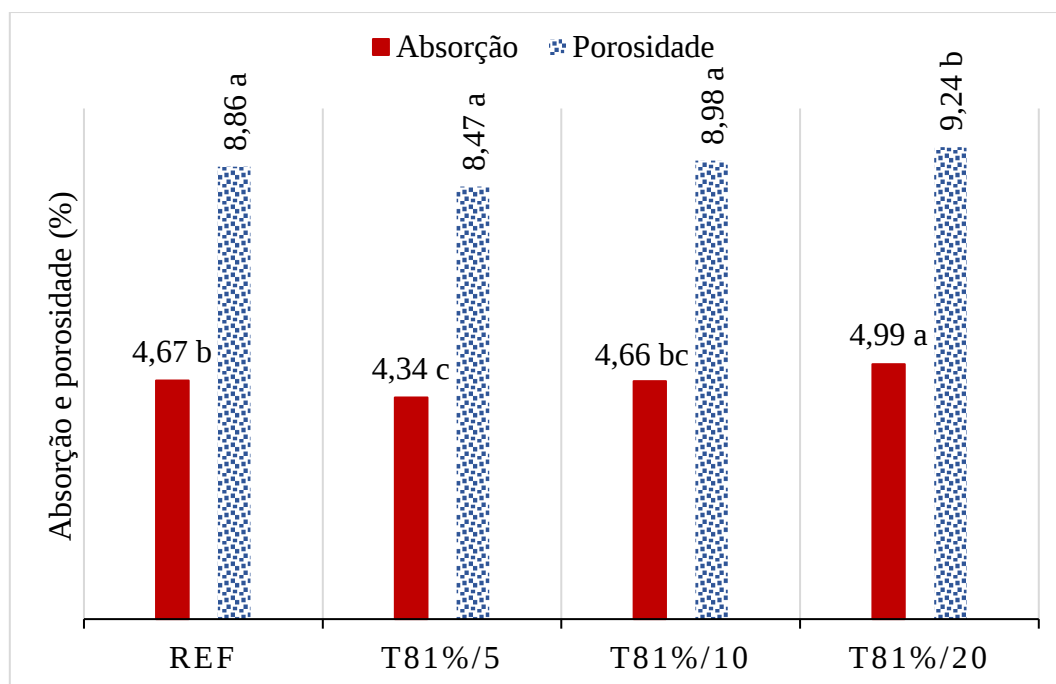
Fonte: Autor (2022).

Camarini e Soares (2018) avaliaram as propriedades no estado endurecido de pastas de cimento e de argamassa com substituição do cimento e da areia por resíduo de isolador de porcelana e verificaram que a resistência à tração na flexão desses materiais apresentou aumento na idade de 7, 28 e 90 dias, sendo o ganho de resistência de 28 para 90 dias mais estável, ou seja, a porcentagem de aumento de resistência de uma idade para a outra foi menor do que a do ganho de 7 para 28 dias.

4.5.3. Absorção e porosidade

A absorção e a porosidade são propriedades relacionadas a durabilidade dos materiais cimentícios. Argamassas com estrutura mais compactada e menos vazios apresentam menores índices de absorção e porosidade, tornando-se mais impermeáveis e, com isso, menos susceptíveis a patologias. A Figura 28 mostra os resultados do ensaio de determinação da absorção do índice de vazios das argamassas estudadas.

Figura 28: Absorção e porosidade das argamassas aos 28 dias.



Fonte: Autor (2022).

Para a argamassa de referência a absorção foi de 4,67% e a porosidade de 8,86%. Para o traço T81%/5 a absorção e a porosidade foram de 4,34 e 8,47% respectivamente. Esse foi o traço que apresentou menor índice de vazios, corroborando com o maior empacotamento das partículas apresentado nas misturas. Já o traço 81%/10 obteve 4,66% de absorção e 8,98% de porosidade, sendo similar aos resultados de referência. Os traços REF, T81%/5 e T81%/20 apresentaram variação significativa entre os resultados, com interação do traço T81%/10 com os traços T81%/5 e T81%/20, de acordo com o Teste de Tukey com 95% de confiança.

Entretanto, o traço T81%/20 resultou na maior absorção e porosidade entre os traços estudados, tal fato pode estar associado a maior substituição do cimento pelo RSF, que afastou a curva de empacotamento real da ideal para as partículas inferiores a 10 μm . Esse distanciamento entre as curvas pode resultar em uma maior conexão entre poros e, consequentemente, maior absorção por parte do material. Em termos estatísticos, esse traço foi o único que apresentou porosidade com variação significativa em relação aos demais.

Como o índice de vazios influencia diretamente nas propriedades mecânicas, é possível observar que o traço T81%/20 apresentou o maior índice de vazios, bem como a

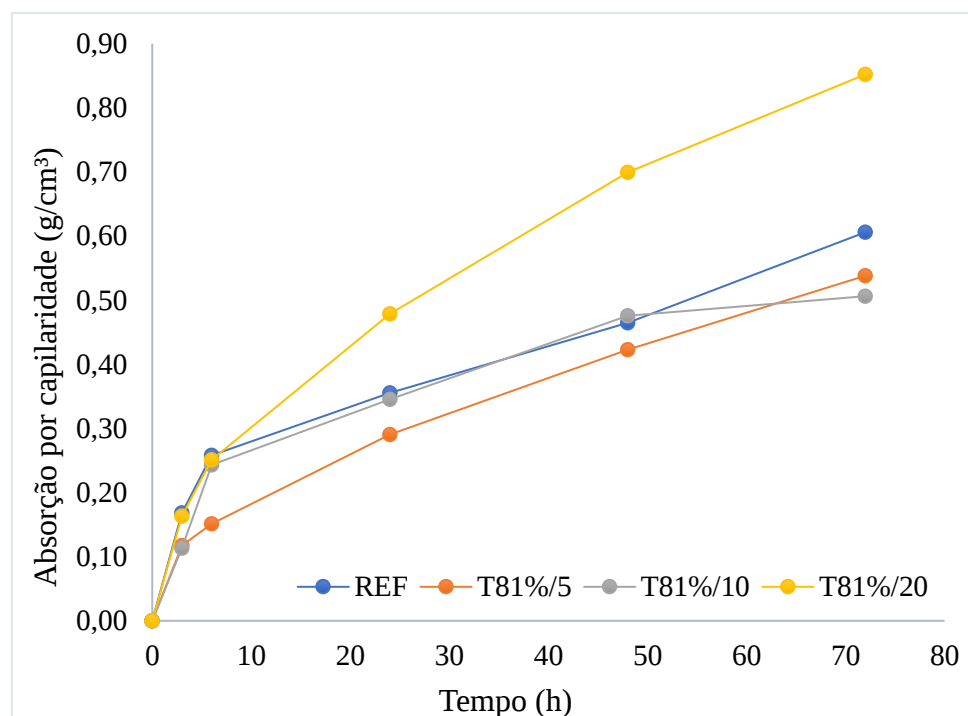
menor resistência à compressão axial aos 120 dias e a menor resistência à tração na flexão, tanto aos 28 como aos 120 dias.

As propriedades citadas foram semelhantes às encontradas nos estudos desenvolvidos por Mendes et al. (2019), Nourredine et al. (2019) e Trentin et al. (2020).

4.5.4. Absorção por capilaridade

A quantidade de água absorvida por unidade de área da argamassa em função do tempo de imersão para os diferentes traços está representada na Figura 29. Como está evidenciado, o traço T81%/5 obteve o menor coeficiente de capilaridade, estando de acordo com as propriedades de absorção e índice de vazios.

Figura 29: Absorção por capilaridade das argamassas aos 28 dias.



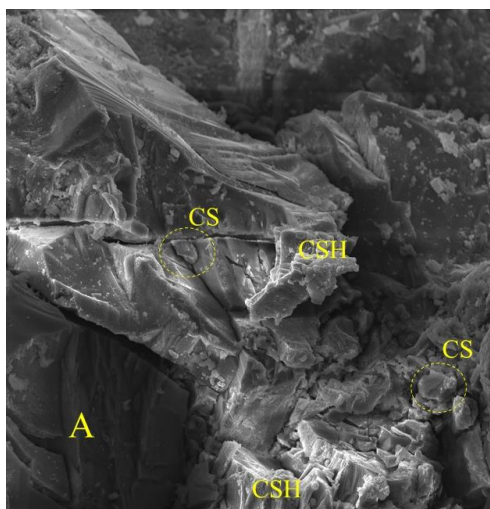
Fonte: Autor (2022).

O traço T81%/10 apresentou comportamento capilar semelhante ao traço de referência, o que também já era esperado de acordo com os resultados apresentados nas propriedades anteriores. E, assim como mostrou ter a maior porosidade, o traço T81%/20 também resultou no maior índice de capilaridade entre as argamassas confeccionadas.

4.5.5. Análise microestrutural e termogravimétrica

A análise microestrutural pelo ensaio de MEV da argamassa de referência aos 28 dias revela a presença de produtos de hidratação do cimento, sendo estes o silicato de cálcio hidratado (CSH) e hidróxido de cálcio (CH). A Figura 30, com ampliação de 1kx, indica a formação de CSH e de placas de portlandita. Na referida figura, a letra “A” indica a identificação de uma partícula de areia.

Figura 30: MEV de argamassa referência aos 28 dias, com aproximação de 1 kx.



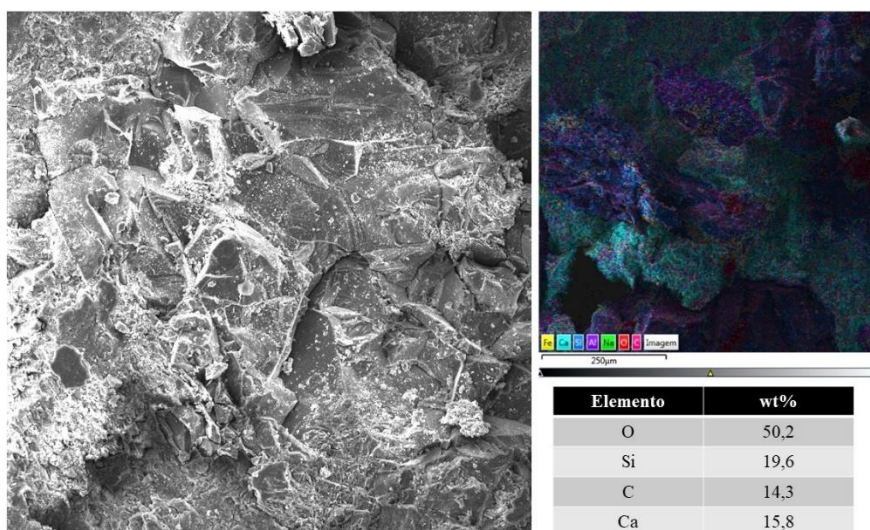
Fonte: Autor (2022).

Foram realizados mapeamentos de EDS para a identificação da composição química da amostra. Na Figura 31 é ilustrado o mapeamento com uma ampliação de 300x.

A partir da análise por EDS observa-se os elementos O, Si, C e Ca em maior porcentagem, sendo estes coerentes com os resultados da análise química dos materiais constituintes da argamassa. A elevada presença de oxigênio pode ser justificada pelo fato de que os elementos químicos dos materiais aplicados estejam em sua maioria na forma de óxidos.

Pelisser, Gleize e Mikowski (2009) mencionam que não existem modelos consensuais da estrutura do CSH que possam relacionar a sua composição química, nano e microestrutura com as suas propriedades físico-mecânicas e químicas. Dessa forma, devido a complexidade da estrutura, há dificuldade em associá-las com as propriedades dos materiais cimentícios que apresentam CSH em sua composição.

Figura 31: MEV com EDS argamassa referência, aproximação de 300x.

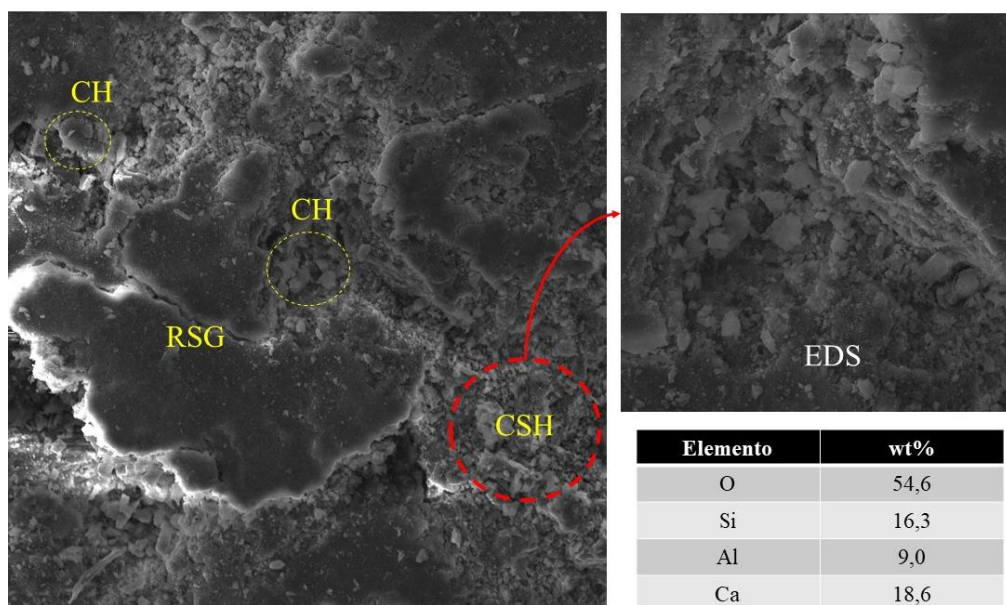


Fonte: Autor (2022).

Pelisser, Gleize e Mikowski (2009) afirmam que a relação Ca/Si influencia na formação de CSH, podendo indicar sua possível presença na composição microestrutural de um material. Segundo com Zhang et al. (2000), a relação Ca/Si variando entre 0,6 e 2 remete a este produto de hidratação. Alguns outros autores sugerem que até mesmo valores superiores a 2 podem indicar a formação de CSH. Dessa forma, o mapeamento por EDS sugere a formação de CSH, já que a relação Ca/Si se encontra em torno de 0,81. Essa sugestão está de acordo com as estruturas contidas na Figura 30.

Para a argamassa T81%/5, aos 28 dias, também foi sugerida a presença de CSH e CH em sua microestrutura, representada na Figura 32a com aproximação de 1kx. A indicação da presença de RSG se deu devido a aplicação de EDS pontual, que indicou uma porcentagem de cálcio de 31%, estando de acordo com o elevado teor de CaO presente na composição química do RSG, conforme Figura 17.

Figura 32: MEV de argamassa T81%/5 aos 28 dias.

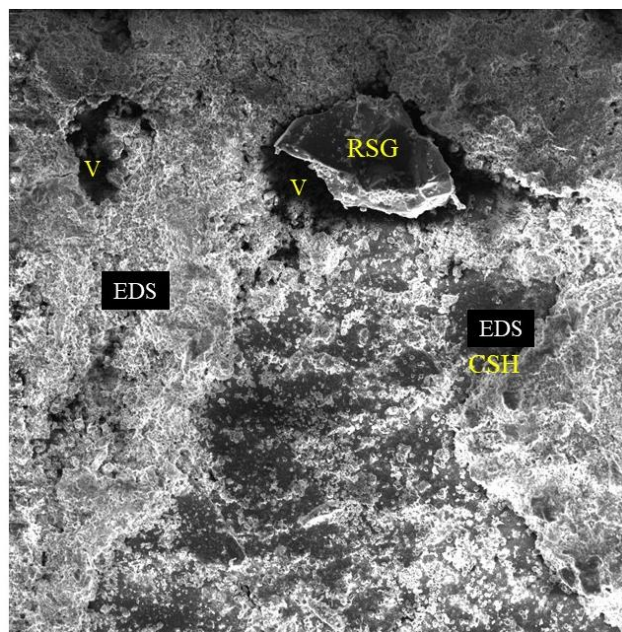


Fonte: Autor (2022).

A Figura 32b é uma aproximação de 3kx, aumentando em detalhe a região circulada em vermelho. Com a aplicação de EDS pontual sobre o local indicado, foi apresentada uma composição de 16,3% de Si e 18,6% de cálcio, resultando numa relação Ca/Si de 1,14, confirmando a possível formação de CSH na região.

Com relação a argamassa T81%/10, foi possível a visualização de estruturas de CSH, sendo confirmadas pela aplicação de EDS pontual que apontou relação Ca/Si igual a 1,47. Também foi aplicado EDS pontual onde possivelmente estava localizada uma partícula de RSG, apresentando teor de cálcio de 48%. A Figura 33 ilustra a região em questão, com aproximação de 500x.

Figura 33: MEV de argamassa T815/10 aos 28 dias.

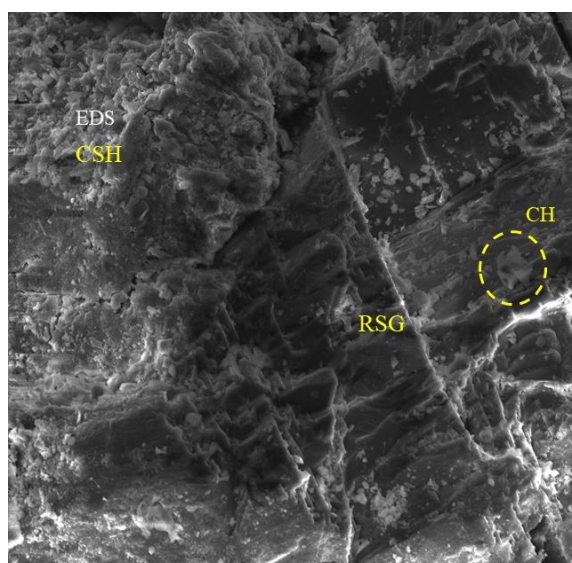


Fonte: Autor (2022).

Na Figura 33 também se visualizam vazios (V). No ponto de EDS localizado à esquerda foi identificada a presença de 26% de Ca, 3,5% de Si e 68,5% de O, podendo-se inferir que esta área apresenta apenas a argamassa.

A Figura 34 representa uma aproximação de 1 kx da argamassa T81%/20. Nela é possível verificar a presença de RSG e visualizar a forma laminar de suas partículas. No ponto em que foi aplicado o EDS foi identificada a presença de cálcio e sílica, com relação Ca/Si de 1,26.

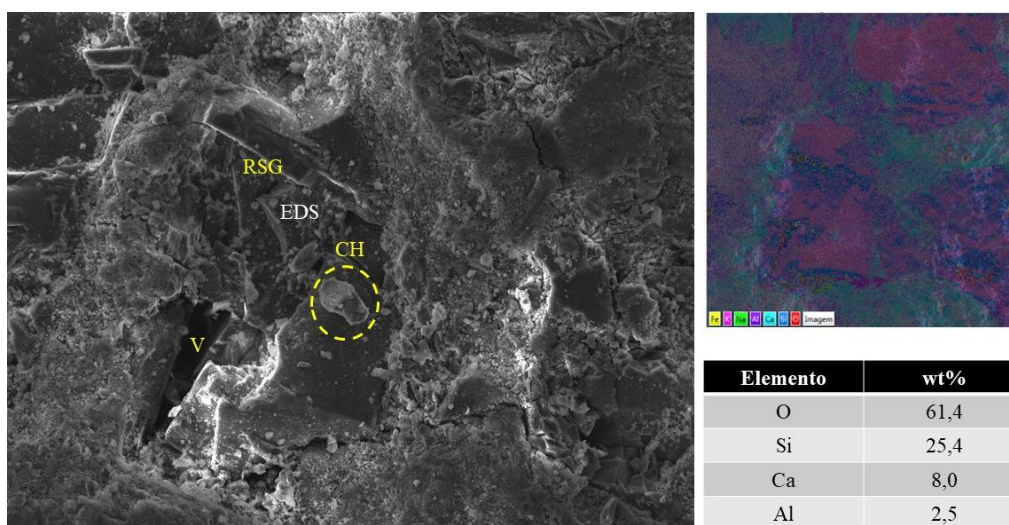
Figura 34: MEV de argamassa T81%/20 aos 28 dias.



Fonte: Autor (2022).

Para a idade de 120 dias também foram realizadas caracterizações microestruturais pela aplicação de MEV nas amostras de argamassa. A Figura 35, com aproximação de 500x, representa o mapeamento por EDS de uma amostra de argamassa de referência. A partir dela nota-se a presença dos elementos químicos Ca e Si, mas com relação entre os dois de 0,31, não podendo-se inferir sobre a presença de CSH na região analisada, devido essa relação ser inferior a 0,6, conforme afirma Zhang et al. (2000).

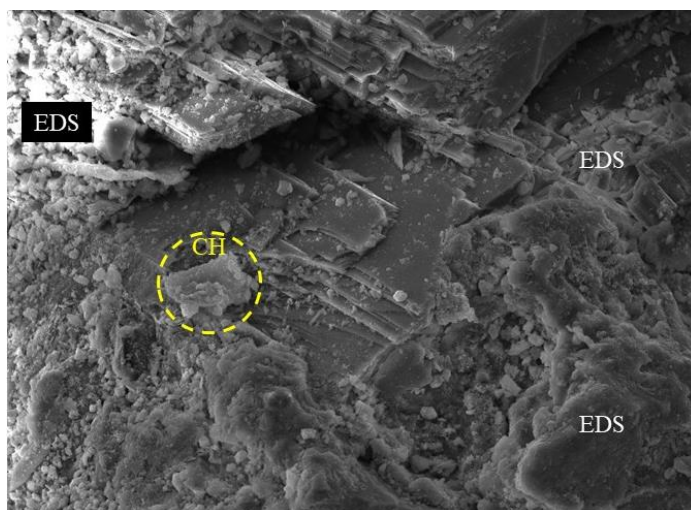
Figura 35: MEV de argamassa referência aos 120 dias.



Fonte: Autor (2022).

Para a argamassa T81%/5 foram realizados EDS pontuais e em todos eles foram constatados a presença de Ca e Si, entretanto, as porcentagens não permitem a associação com a presença de CSH. A Figura 36 mostra, com aproximação de 1 kx, a região analisada e os pontos de aplicação de EDS.

Figura 36: MEV argamassa T81%/5 aos 120 dias.

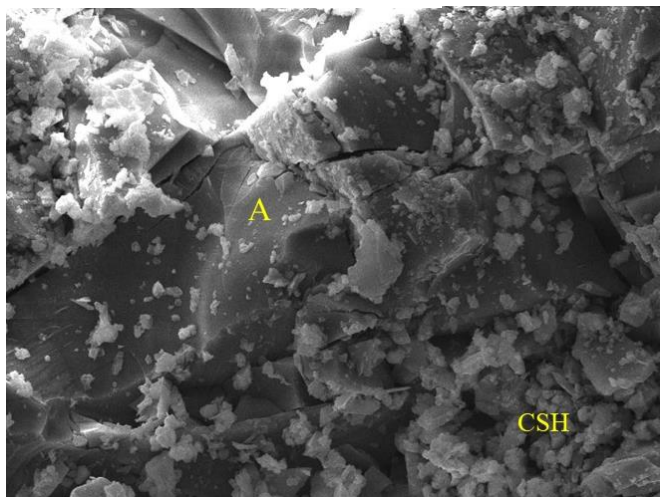


Fonte: Autor (2022).

As relações Ca/Si foram, dos pontos de EDS da esquerda para a direita, de 0,49, 0,36 e 0,41, respectivamente.

A argamassa T81%/10 está representada na Figura 37, com aproximação de 2 kx. Analisando-a é possível observar a presença de partículas de areia e de CSH, sendo estas confirmadas pela aplicação de EDS pontual. O EDS sobre o ponto da areia apresentou composição de 38% de sílica, sem a presença de cálcio. E o EDS aplicado sobre o ponto de CSH mostrou ter relação Ca/Si de 1,33.

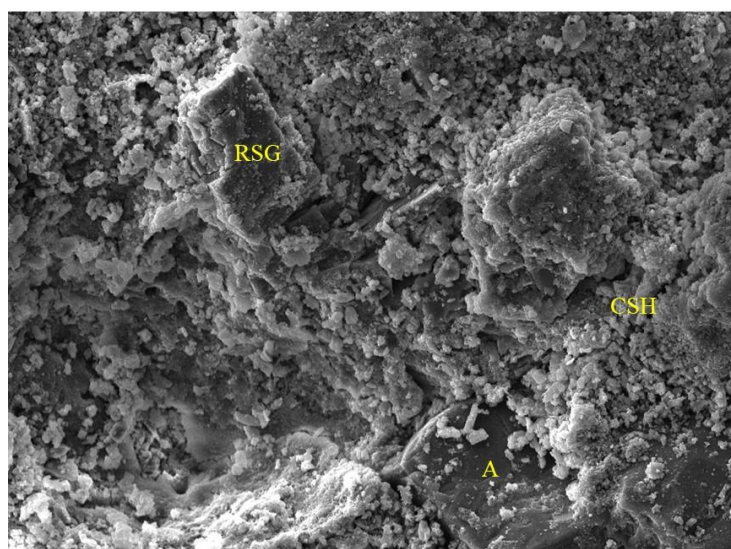
Figura 37: MEV argamassa T81%/10 aos 120 dias.



Fonte: Autor (2022).

E, para a argamassa T81%/20 com 120 dias de cura, também foram feitas análises pontuais com EDS. A Figura 38, com aproximação de 1 kx, ilustra os elementos identificados a partir da aplicação do EDS.

Figura 38: MEV argamassa T81%/20 aos 120 dias.



Fonte: Autor (2022).

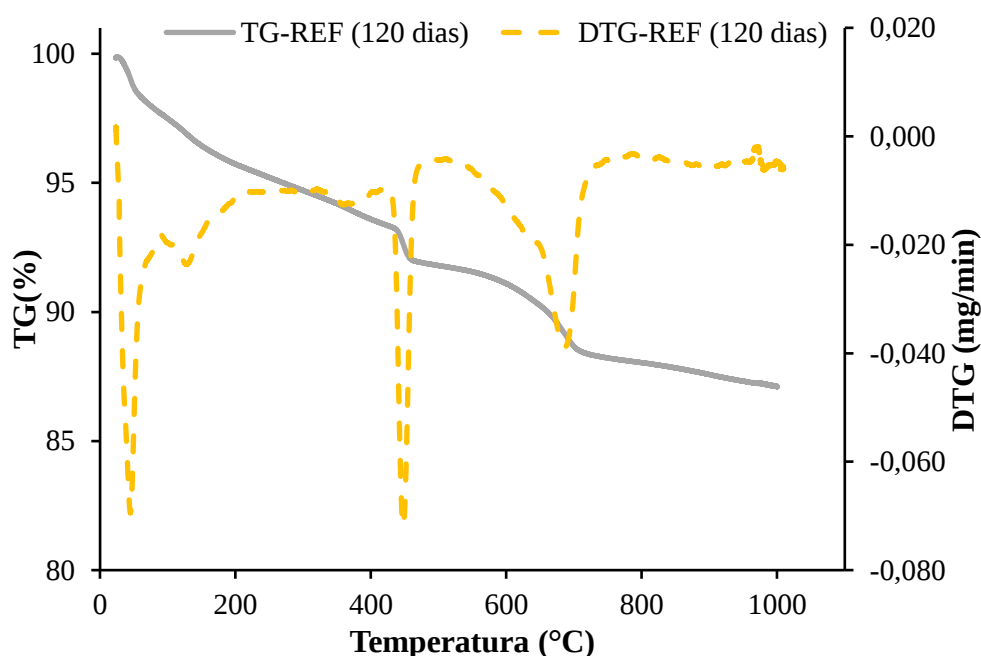
A partir da Figura 38 é perceptível a identificação de partículas de RSG, areia e de CSH, sendo a relação Ca/Si dessa região de 2,41. No EDS aplicado sobre a partícula

de RSG foi identificada a presença de 21,8% de cálcio e 12,2% de ouro, sendo este comum de ser encontrado em pequenas quantidades junto ao resíduo de scheelita, conforme afirma Silva et al. (2019).

Aos 120 de idade, as argamassas foram submetidas às análises termogravimétricas. As curvas TG/DTG da argamassa de referência são apresentadas na Figura 39. A partir de sua análise, é perceptível que a perda de massa dos componentes da argamassa se deu em quatro etapas.

O primeiro pico (em torno de 100°C) pode evidenciar a perda de umidade presente nos poros da argamassa e a perda de etringita, sendo registrada a redução de 2,51% de massa. O segundo pico, em menor tamanho, pode se tratar da perda de massa do CSH a partir de 120°C até em torno de 400°C, com perda em torno de 3,25%. A partir de 420°C até 460°C pode-se apontar a perda de massa referente a portlandita, com perda registrada de 1,36%. E, entre as temperaturas de 600°C a 800 °C pode-se evidenciar a decomposição da calcita, perdendo aproximadamente 3,05% de massa.

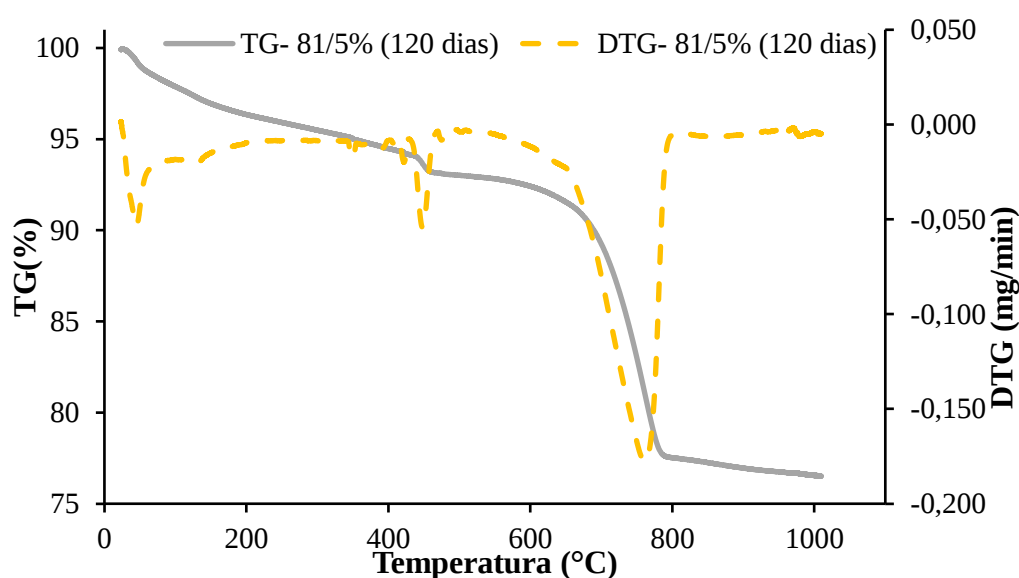
Figura 39:Curvas TG/DTG da argamassa de referência aos 120 dias.



Fonte: Autor (2022).

A Figura 40 refere-se as curvas TG/DTG da argamassa T81%/5. A perda de massa desse traço se deu em três principais picos. Assim como a argamassa de referência, o primeiro pico se deu entre 55°C e 100°C, podendo-se supor a perda de massa como sendo a água presente nos poros e/ou de etringita, com perda de 1,22%. O segundo pico se deu entre 425°C e 470°, sendo possível inferir sobre a decomposição da portlandita presente nesse traço, com redução de 1,14% de massa. O terceiro pico se encontra entre as temperaturas de 640°C a 810°C, podendo ser associada a perda de massa do composto calcita; perda essa de 14,29%.

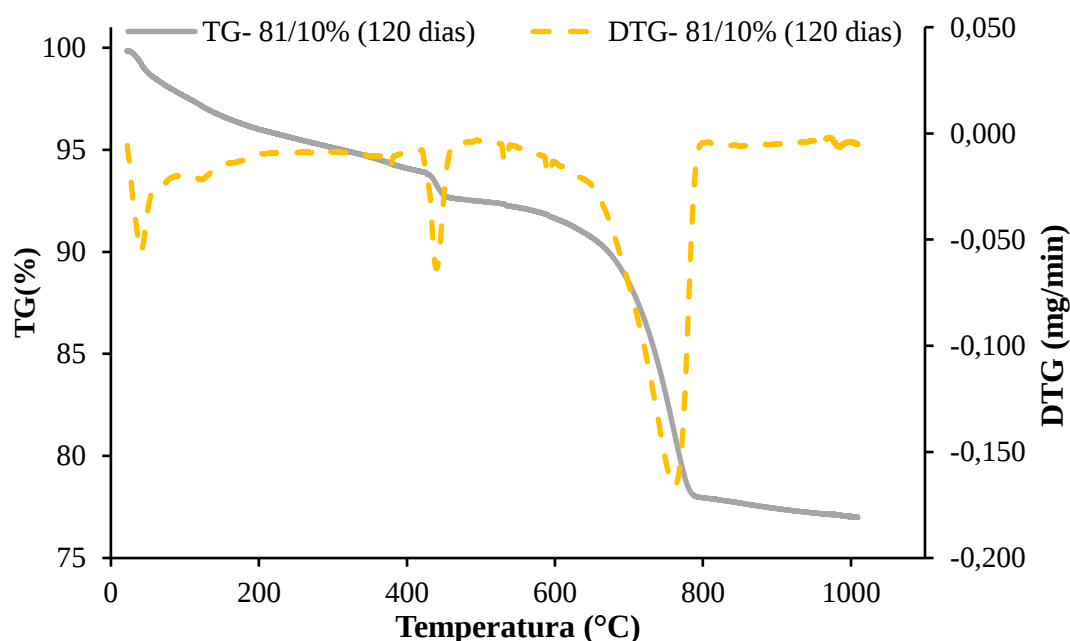
Figura 40: Curvas TG/DTG da argamassa T81%/5 aos 120 dias.



Fonte: Autor (2022).

Para a argamassa T81%/10, as curvas TG/DTG são ilustradas na Figura 41. A partir de sua análise é perceptível que a perda de massa também se deu em três fases, apresentando três picos. No primeiro pico, localizado entre 22°C e 122°C, supõe-se a perda de massa de água e etringita. No segundo pico, estando este entre 385°C e 465°C, assume-se a perda de massa de CH. E no terceiro pico, delimitado pelas temperaturas de 639°C a 812°C, infere-se sobre a decomposição da calcita.

Figura 41: Curvas TG/DTG da argamassa T81%/10 aos 120 dias.

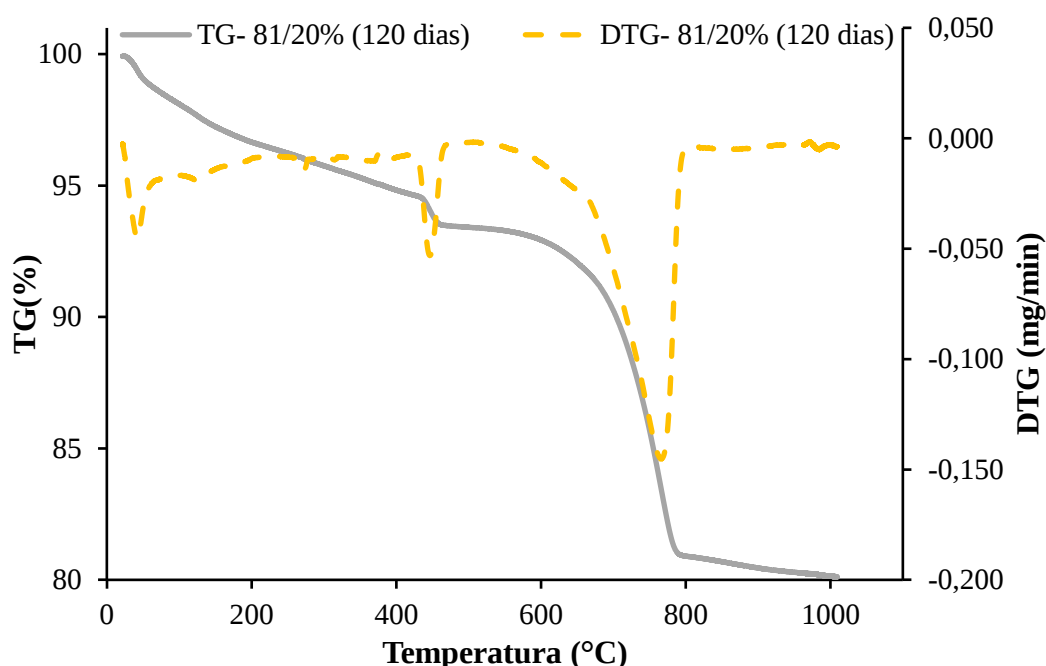


Fonte: Autor (2022).

As perdas de massa foram de 2,67%, 1,62% e 13,04%, respectivamente, do primeiro ao terceiro pico.

A argamassa T81%/20 tem as suas curvas de TG/DTA representadas na Figura 42. As perdas de massa também se apresentam em três picos. O primeiro pico encontra-se entre 22°C e 110°C, o segundo entre 429°C e 463°C e o terceiro entre 690°C e 770°C. Assim como para os demais traços de argamassas estudados nessa pesquisa, pode-se supor a perda de massa para os picos um, dois e três como sendo de água, portlandita e carbonato de cálcio, respectivamente. A perda no primeiro pico foi de 1,98%, no segundo de 1,10% e no terceiro de 7,90%.

Figura 42: Curvas TG/DTG da argamassa T81%/20 aos 120 dias.



Fonte: Autor (2022).

Segundo Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016) e Nourredine et al. (2019), em materiais cimentícios as principais perdas de massa são de 50°C a 130°C, referindo-se à água presente entre os poros e da desidratação; entre 400°C e 500°C, sendo decomposta a portlandita; de 500°C a 600°C a magnesita; e entre 600°C e 800°C a calcita. A etringita pode ter perda de massa em duas fases, estando estas em torno de 100°C a 130°C e entre 200°C e 400°C. A temperatura de perda de água dos compostos hidratados depende da quantidade disponível de CaO e SiO₂ presente na matriz cimentícia (VEDALAKSHMI et al., 2003).

É importante notar que nas argamassas com incorporação de resíduo de scheelita é sugestiva a ocorrência de elevadas perdas de massa referentes ao carbonato de cálcio, diferentemente da argamassa de referência, que apresentou apenas 3,05% de perda desse composto. Esse comportamento deve-se ao fato de que o resíduo de scheelita, seja ele grosso ou fino, é quimicamente composto por elevado teor de calcita, contribuindo com o aumento da presença de cálcio nas argamassas com substituição.

Outrossim, é válida a observação de que a argamassa de referência foi a que apresentou maior perda de massa de CH, podendo ser associada à composição da argamassa, que apresenta maior quantidade de cimento do que as demais com

substituição. Essa relação pode ser justificada devido ao CH ser um produto resultante do processo de hidratação o cimento. Além disso, isso também pode ser considerado como um possível indicativo de reação pozolânica nas argamassas com presença do RSF, resultado no consumo de CH e, conseqüentemente, reduzindo sua disponibilidade (AMARAL et. al, 2021).

Ainda, ressalta-se que, as análises de TG/DTG podem indicar a perda de massa do composto etringita, entretanto estes não são indicativos nas análises de MEV. Isto pode ocorrer devido a sua detecção não ser tão simples devido ao difícil acesso do EDS em poros rodeados por agregados de sílica e à quantidade de CSH em sua vizinhança (MEDINA et al., 2012).

4.6. CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS – CDI

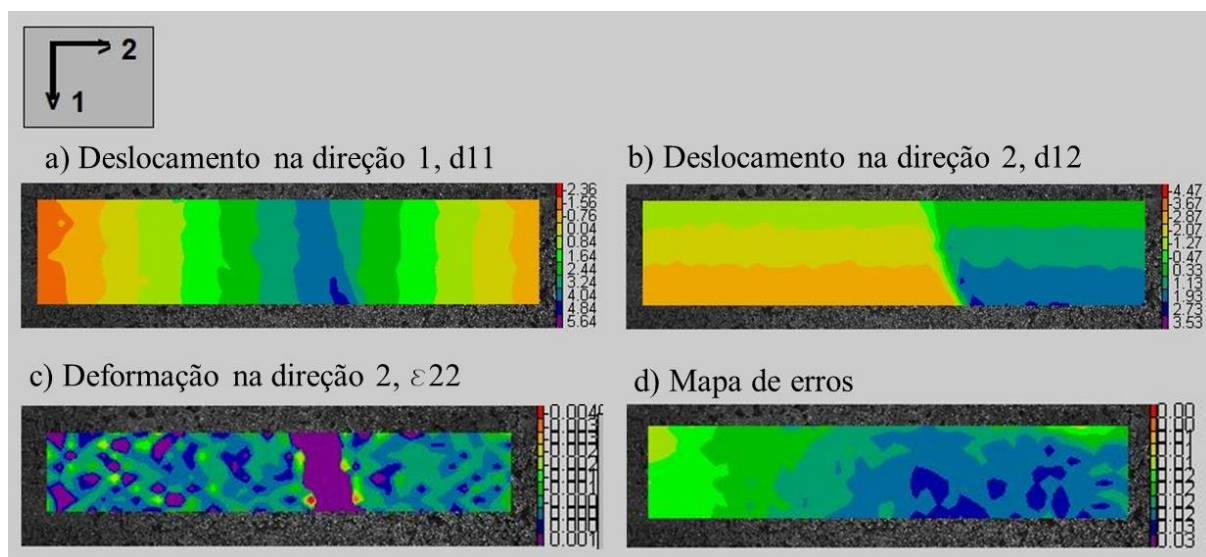
4.6.1. Campos cinemáticos

As Figuras 43, 45, 46 e 47 ilustram os deslocamentos e deformações as argamassas no momento do rompimento dos corpos de prova, apresentadas na seguinte sequência de traços: referência, T81%/5, T81%/10 e T81%/20. As figuras são compostas por quatro representações, sendo estas: a) deslocamento na direção 1 (vertical), b) deslocamento na direção 2 (horizontal), c) campos de deformação na direção 2 e d) mapa de erros.

Ao analisar os deslocamentos, tanto na direção 1 como na 2, percebe-se que as faixas não são bem definidas, fato que pode ser justificado devido a argamassa ser um material heterogêneo, não apresentando comportamento uniforme.

O sinal negativo na escala dos deslocamentos indica que estes aconteceram em sentido contrário ao positivo adotado, conforme apresenta a orientação nas figuras. As unidades das escalas estão em pixels, onde 1 pixel equivale a 0,256 mm para esta análise.

Figura 43: Campos cinemáticos para a argamassa referência na ruptura.

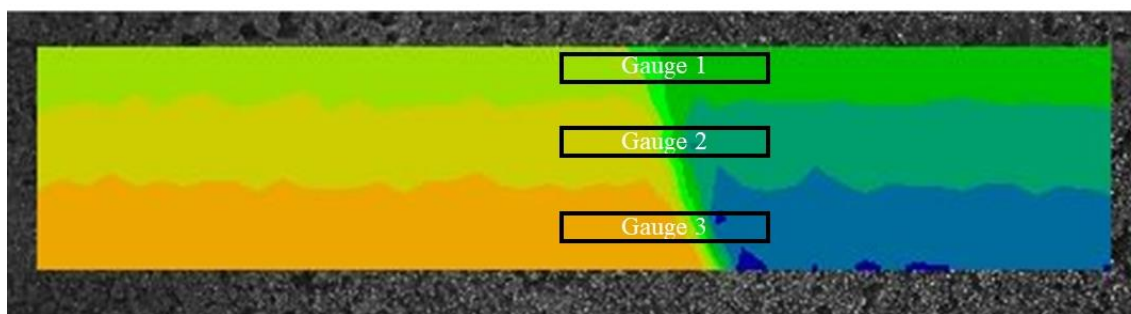


Fonte: Autor (2022).

Na Figura 43a) observa-se que a faixa central de deslocamento (coloração azul claro) apresenta valor de 4,04 pixels. Isso significa que, nessa faixa, houve deslocamento vertical de cima para baixo de 1,03 mm. Tal deslocamento é compatível com a forma de aplicação da carga de ruptura durante o ensaio, que se dá na mesma direção e sentido. Ao afastar-se horizontalmente da faixa central em direção as extremidades, percebe-se que de deslocamento variam de modo não uniforme, até o ponto em que se apresentam de forma negativa (a partir da coloração laranja claro, 0,76 pixels). Esse comportamento se dá devido a flexão que ocorre no corpo de prova devido a aplicação da carga central.

Como pode ser observado na Figura 43b), os deslocamentos na direção 2 ocorrem em três faixas horizontais. Essas faixas são verticalmente divididas por uma região se igual deslocamento, sendo esta a região onde ocorreu a ruptura do corpo de prova. A esquerda dessa região, os deslocamentos são negativos, ou seja, ocorreram para o lado esquerdo, enquanto a direita, os deslocamentos são positivos, ocorrendo para a direita. Para a determinação dos gauges, escolheu-se uma região localizada em cada faixa de cores, conforme mostra a Figura 44.

Figura 44: Gauges selecionados para análise das deformações.

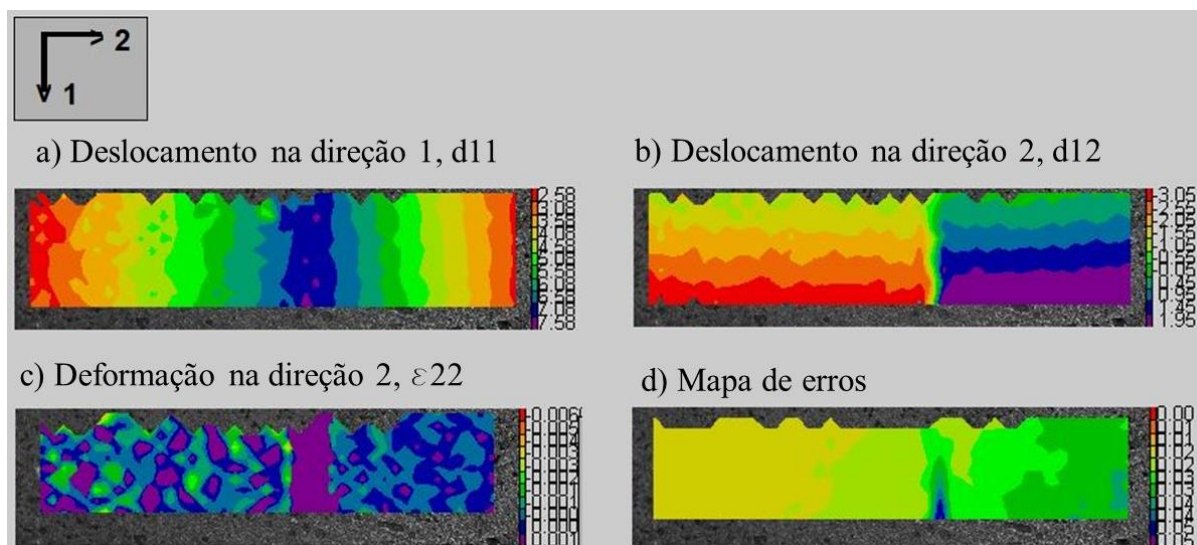


Fonte: Autor (2022).

Na faixa do gauge 1, a abertura da fissura foi de 0,8 pixels ($|-0,47| + 0,33$) ou 0,20 mm. No gauge 2, a abertura de fissura foi de 3,2 pixels ($|-2,07| + 1,13$), ou 0,82 mm. E, na região do gauge 3, a abertura de fissura foi de 4,8 pixels ($|-2,87| + 1,93$), ou 1,23 mm.

Na Figura 43c) visualiza-se que a faixa de deformação na região da fissura (cor roxa) apresenta valor de 0,001 pixels/pixels ou 0,1%. Nos campos de deformação, observa-se que as cores predominantes estão entre azul e verde, que representam deformação zero. Observa-se ainda, na Figura 43d), o mapa de erros que varia de 1% (coloração verde claro) a 3% (azul escuro).

Figura 45: Campos cinemáticos para a argamassa T81%/5 na ruptura.



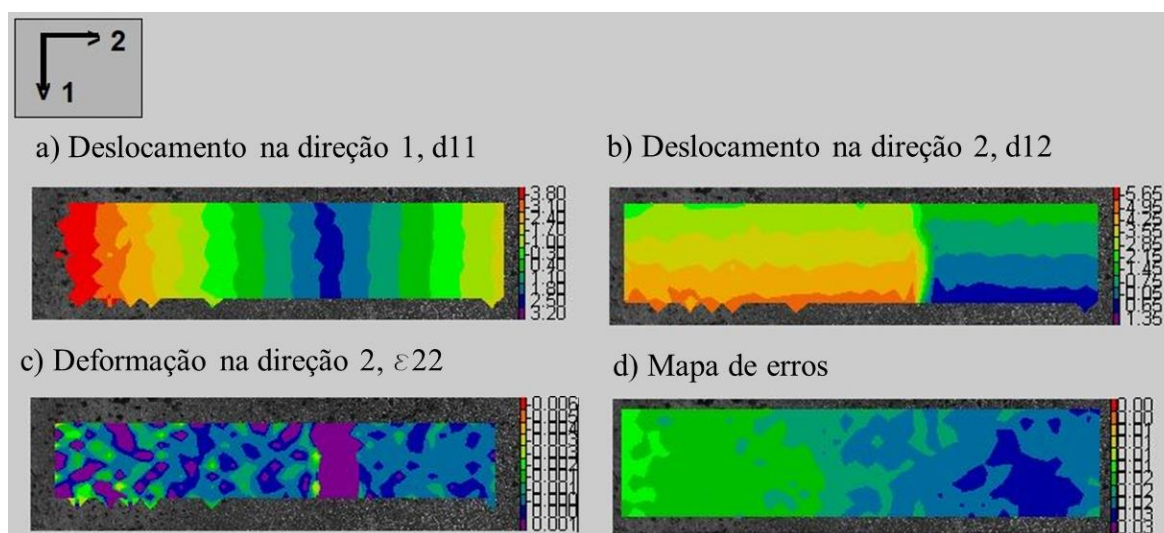
Fonte: Autor (2022).

Na Figura 45a) observa-se a presença de uma faixa central (cor azul escuro) de deslocamento na direção 1, sendo no valor de 7,08 pixels (1,81 mm), contendo ainda alguns pontos de maior deslocamento (cor roxa), com valor de 7,58 pixels (1,94 mm). Afastando-se do centro para as extremidades, notam-se variações até atingir o menor deslocamento de 2,58 pixels (0,66 mm).

Na Figura 45b) também foram escolhidas três faixas de gauge. No gauge 1, a abertura da fissura foi de 1,6 pixels ($|-1,05| + 0,55$) ou 0,41 mm. No gauge 2, a abertura de fissura foi de 4,0 pixels ($|-2,55| + 1,45$), ou 1,02 mm. E, na região do gauge 3, a abertura de fissura foi de 5,0 pixels ($|-3,05| + 1,95$), ou 1,28 mm.

Observando-se a Figura 45c) é possível perceber que a presença da faixa onde ocorreu a ruptura (cor roxa), com valor de deslocamento na direção 2 de 0,001 pixels/pixels ou 0,1%. Nos campos de deformação, observa-se que as cores predominantes estão entre azul e verde, ou seja, deformação zero. Entretanto, também se verifica a presença de pontos roxos (deslocamentos de 0,1%) espalhados na região esquerda à fissura. Na Figura 45d) é apresentado o mapa de erros, que varia de 1% (coloração amarelada) a 5% (azul escuro).

Figura 46: Campos cinemáticos para a argamassa T81%/10 na ruptura.



Fonte: Autor (2022).

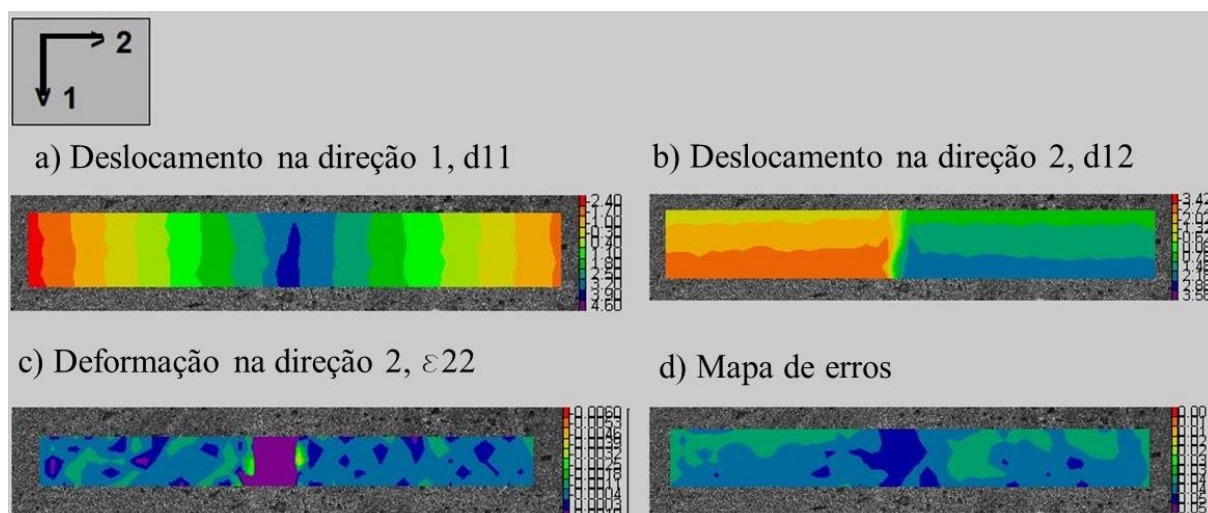
Nota-se a presença de uma faixa central (cor azul escuro) de deslocamento na direção 1, sendo no valor de 2,50 pixels (0,63 mm) na Figura 46a). Da região do centro

até as extremidades, percebem-se variações até atingir o menor deslocamento, sendo este de -3,80 pixels (0,97 mm) à esquerda e 1,70 pixels (0,44 mm) à direita.

Foram escolhidas três faixas de gauges para análise. Considerando-se os deslocamentos na direção 2, representados na Figura 46b), para o gauge 1, a abertura da fissura foi de 4,3 pixels ($|-2,85| + 1,45$) ou 1,10 mm. No gauge 2, a abertura de fissura foi de 4,3 pixels ($|-4,25| + 0,05$), ou 1,10 mm. E, na região do gauge 3, a abertura de fissura foi de 5,6 pixels ($|-4,95| + 0,65$), ou 1,43 mm.

Na Figura 46c) percebe-se a presença da faixa onde ocorreu a ruptura (cor roxa), com valor de deslocamento na direção 2 de 0,001 pixels/pixels ou 0,1%. Nos campos de deformação, nota-se que há predominância de deformações nulas. E, na Figura 46d) é apresentado o mapa de erros, que varia de 1% (coloração verde clara) a 3% (azul escuro).

Figura 47: Campos cinemáticos para a argamassa T81%/20 na ruptura.



Fonte: Autor (2022).

Na Figura 47a) é notável a presença de uma faixa central (cor azul escuro) de deslocamento na direção 1, sendo no valor de 3,90 pixels (1,0 mm). Partindo-se do centro para as extremidades, notam-se variações até o ponto de menor deslocamento, sendo de -2,40 pixels (0,61 mm) à esquerda e de 1,70 pixels (0,44 mm) à direita.

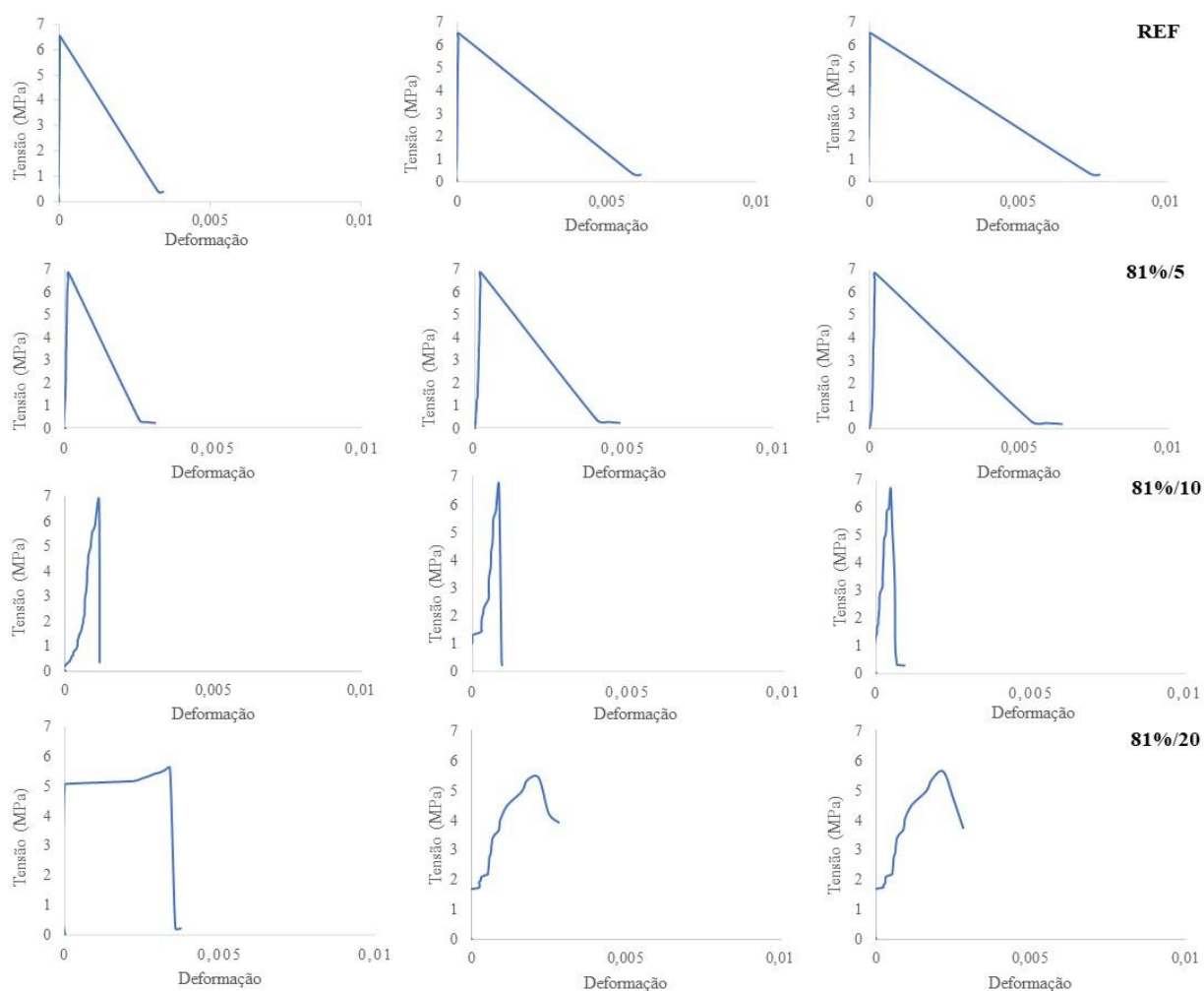
Escolheram-se três faixas para análise de gauge. A partir dos deslocamentos na direção 2, ilustrados na Figura 47b), para o gauge 1, a abertura da fissura foi de 2,1 pixels ($|-1,32| + 0,78$) ou 0,54 mm. No gauge 2, a abertura de fissura foi de 4,9 pixels ($|-2,02| +$

1,48), ou 0,90 mm. E, na região do gauge 3, a abertura de fissura foi de 4,9 pixels ($|-2,72| + 2,18$), ou 1,25 mm.

Na Figura 47c) percebe-se a presença da faixa onde ocorreu a ruptura (cor roxa), com valor de deslocamento na direção 2 de 0,001 pixels/pixels ou 0,1%. Nos campos de deformação, nota-se a predominância da coloração azul clara, indicando deformações de -0,0004 pixels/pixels ou de 0,04%. Na Figura 47d) é ilustrado o mapa de erros, que varia de 4% (coloração verde clara) a 5% (azul escuro).

A Figura 48 apresenta as curvas de tensão x deformação das argamassas estudadas. Essas curvas foram construídas com os resultados obtidos pela análise dos gauges com o auxílio do Correli^{Q4} e com os dados de tensão fornecidos pela máquina universal de ensaios. Na primeira linha encontram-se as curvas da argamassa de referência, na segunda linha estão as argamassas T81%/5, na terceira as argamassas T81%/10 e na quarta linha estão apresentadas as curvas das argamassas T81%/20. Na primeira coluna estão os dados dos gauges 1, na segunda os dados do gauge 2 e na terceira o gauge 3.

Figura 48: Curvas tensão x deformação obtidas pela CDI.



Fonte: Autor (2022).

Analisando-se a Figura 48, observa-se que, conforme esperado, a deformação na faixa 3 foi superior as deformações nas faixas 1 e 2. É importante destacar a semelhança entre as curvas obtidas pela argamassa de referência e pela T81%/5, haja vista que as duas argamassas também se comportaram de forma semelhante no ensaio de resistência à tração na flexão. Dessa forma, assim como há similaridade entre os valores de resistência dos dois traços, também há equivalência de deformações. Observa-se ainda que, a argamassa de referência apresentou a menor abertura de fissuras entre os traços estudados, apesar de não ter sido a formulação com maior resistência à tração na flexão aos 28 dias. O traço T81%/10, que obteve a maior resistência, demonstrou comportamento de abertura de fissuras quase constante entre os gauges analisados. Para o primeiro e segundo gauge,

a abertura foi de 1,10 mm e para o terceiro de 1,43 mm, diferentemente dos demais traços, que apresentaram fissuras menores na região do primeiro gauge.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos no delineamento experimental, verifica-se a que existe viabilidade em substituir de forma parcial e simultânea o agregado miúdo por resíduo de scheelita grosso e o cimento por resíduo de scheelita fino tratado, em argamassas de cimento Portland. Tal afirmação é realizada com base na caracterização dos materiais constituintes e nas propriedades que foram aferidas, comparando-se uma argamassa de referência com as demais com substituições. Desse modo, as principais conclusões da utilização desses resíduos como substituições em argamassas são:

A areia e o resíduo de scheelita grosso (RSG) apresentam semelhanças na composição química, sendo o RSG formado, preponderantemente, por óxido de cálcio e dióxido de silício. O resíduo possui massa específica superior à da areia, a julgar pela presença de trióxido de tungstênio em sua composição. O RSG ainda apresenta granulometria similar à da areia, apresentando propriedades físicas que a classificam como um material aplicável na forma de agregado miúdo segundo as normas brasileiras vigentes.

O cimento possui granulometria inferior à do resíduo de scheelita fino (RSF) e massa específica superior à deste. Entretanto, tratando-se da composição química, ambos os materiais apresentam o CaO e o SiO₂ como os principais elementos constituintes. Com relação a atividade pozolânica do RSF, após o tratamento térmico e mecânico foi verificado aumento nessa propriedade, entretanto, ainda não apresentou valores mínimos para classificação do material como pozolânico.

A partir da aplicação do método para a determinação do Teor fixo a ser determinado (TFD) para melhor compatibilização granulométrica entre a areia e o RSG, foi encontrada a melhor mistura teórica entre os materiais, sendo esta constituída por 19% de areia retida na peneira 2,36 e 81% de RSG.

No estado fresco, a trabalhabilidade das argamassas com substituição foi superior à da argamassa de referência, aumentando à medida que foi sendo elevado o teor de substituição do cimento pelo RSF. A massa específica também apresentou o comportamento semelhante.

No estado endurecido, a resistência à compressão aos 28 e 120 dias foi maior para o traço T81%/5, sendo 97% e 5%, respectivamente, superior a resistência apresentada pela argamassa referência nas mesmas idades. Para as composições de T81%/10 e

T81%/20, a resistência à compressão aos 28 dias também foi superior a referência, porém, esse comportamento não permaneceu aos 120 dias. Para a resistência à tração na flexão, o traço T81%/5 obteve resistência muito próxima à referência (diferença inferior a 1%), aos 28 dias. Aos 120 dias, o T81%/5 continuou apresentando a maior resistência entre as composições.

O índice de absorção e porosidade da argamassa de referência foi similar ao da argamassa T81%/5. Para os traços T81%/10 e T81%/20, estes apresentaram maior absorção e porosidade quando comparado com as demais composições. Esse comportamento permanece válido para a propriedade de absorção por capilaridade. Nota-se que, o traço T81%/5 possui o melhor empacotamento de partículas e, consequentemente, maior refinamento dos poros presentes na estrutura da argamassa.

A aplicação da técnica de Correlação Digital de Imagens (CDI) permitiu gerar gráficos tensão x deformação das argamassas e calcular a abertura das fissuras em cada faixa de deslocamento dos corpos de prova. A partir da análise das curvas, observou-se que as faixas inferiores dos corpos de prova deslocam-se mais que as superiores. Com relação à abertura das fissuras, constatou-se que a utilização do resíduo de scheelita não as reduz.

Diante das conclusões apresentadas após a investigação experimental das propriedades supracitadas, pode-se afirmar que a substituição do cimento pelo RSF e da areia pelo RSG, tem potencial de ser utilizada como forma de melhoria ao desempenho das argamassas, sendo o traço T81%/5 o mais viável para utilização. Desse modo, tem-se uma redução no consumo de matérias primas e uma destinação sustentável aos resíduos.

6. REFERÊNCIAS

- AFUM, B. O.; CAVERSON, D.; BEN-AWUAH, E.. A conceptual framework for characterizing mineralized waste rocks as future resource. **International Journal of Mining Science and Technology**, [S. l.], v. 29, n. 3, p. 429–435, 2019. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.07.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.07.002>.
- AL-JABRI, K. S.; HISADA, M.; AL-SAIDY, A. H.; AL-ORAIMI, S. K. Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 23, n. 6, p. 2132–2140, 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.12.013.
- ALMEIDA, J.; RIBEIRO, A. B.; SILVA, A. S.; FARIA, P. Overview of mining residues incorporation in construction materials and barriers for full-scale application. **Journal of Building Engineering**, [S. l.], v. 29, n. October 2019, p. 101215, 2020. a. DOI: 10.1016/j.job.2020.101215. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101215>.
- ALMEIDA, J.; SANTOS SILVA, A.; FARIA, P.; RIBEIRO, A. Applying Chemometrics to Evaluate Tungsten Mining Residues Potential As Partial Cement Replacement. **Kne Engineering**, [S. l.], v. 2020, p. 228–237, 2020. b. DOI: 10.18502/keg.v5i4.6814.
- AMIN, N. U.; ALAM, S.; GUL, S. Assessment of pozzolanic activity of thermally activated clay and its impact on strength development in cement mortar. **RSC Advances**, [S. l.], v. 5, n. 8, p. 6079–6084, 2015. DOI: 10.1039/c4ra12237b.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO (ANEPAC). Demanda por agregados (2000 a 2021) e projeção (2022). Disponível em: https://www.anepac.org.br/media/k2/items/cache/161bb2cd9d87d4fb2583e55eca6a3af4_XL.jpg. Acessado em: 10 de agosto de 2022.
- ANM, Agência Nacional de Mineração-. Tungstênio. [S. l.], n. 1, p. 1–4, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752** Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do Índice de Consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 132781** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895** Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle Modificado. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778** Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.

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

BELLO, I.; WARDEH, G.; GONZALEZ-FONTEBOA, B.; MARTINEZ-ABELLA, F. Strain measurement of construction materials with digital image correlation. **2021 fib Symposium of Concrete Structures: New Trends for Eco-Efficiency and Performance, June 14, 2021 - June 16, 2021**, [S. l.], v. 2021-June, n. Rastogi 2000, p. 1529–1538, 2021. Disponível em: <https://www.fib-international.org/publications/fib-proceedings/i-fib-i-symposium-in-lisbon,-portugal-2021-proceedings-em-pdf-em-detail.html>.

BOUZIDI, M. A.; BOUZIDI, N.; TAHAKOURT, A. Valorization of iron ore beneficiation rejects from the iron deposit of Boukhadra (Algeria) in the fabrication of ordinary Portland cement. **Thermo-Mechanics Applications and Engineering Technology**, [S. l.], p. 59–79, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-70957-4_3.

BREITENBACH, S. B.; SANTOS, O. C.; S ANDRADE, J. C.; NASCIMENTO, R. M.; MARTINELLI, A. E.; SANTOS, Emidio. Adição de resíduo do polimento de porcelanato em argamassas de restauro à base de cal (Addition of porcelain tile polishing residue in lime mortars for restoration). **Cerâmica**, [S. l.], v. 63, p. 395–401, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633672182>.

BUDAK, M.; AKKURT, S.; BÖKE, H. Evaluation of heat treated clay for potential use in intervention mortars. **Applied Clay Science**, [S. l.], v. 49, n. 4, p. 414–419, 2010. DOI: 10.1016/j.clay.2009.11.031. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2009.11.031>.

CAMARINI, G.; SOARES, M. S.. Propriedades de argamassas de cimento produzidas com resíduo de isolador de porcelana. **Revista Materia**, [S. l.], v. 23, n. 1, 2018. DOI: 10.1590/s1517-707620170001.0302.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2^aed. São Paulo, IBRACON, 2010. Vol.1. p. 893-943.

CARLOS, E. M. EFEITO DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE SCHEELITA NO

COMPORTAMENTO TÉRMICO-MECÂNICO E REOLÓGICO DE ARGAMASSAS PARA ENGOBES CERÂMICOS. World Development. Natal/RN. Disponível em:

<http://www.fao.org/3/I8739EN/i8739en.pdf>
<http://dx.doi.org/10.1016/j.adolescence.2017.01.003>
<http://dx.doi.org/10.1016/j.chilgyouth.2011.10.007>
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23288604.2016.1224023>
<http://pdx.sagepub.com/lookup/doi/10.1016/j.powtec.2020.02.012>

CARVALHO, E. B.; PETTA, R. A. BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DA MINA BREJÚRN. [S. l.], n. 1997, p. 75–81, 2002.

CHEN, J. J.; LI, B. H.; NG, P. L.; KWAN, A. K. H. Adding granite polishing waste as sand replacement to improve packing density, rheology, strength and impermeability of mortar. **Powder Technology**, [S. l.], v. 364, p. 404–415, 2020. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.02.012.

CHEN, J. J.; NG, P. L.; KWAN, A. K. H.; LI, L. G. Lowering cement content in mortar by adding superfine zeolite as cement replacement and optimizing mixture proportions. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 210, p. 66–76, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.007.

CHOI, Y. W.; KIM, Y. J.; CHOI, O.; LEE, K. M.; LACHEMI, M. Utilization of tailings from tungsten mine waste as a substitution material for cement. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 23, n. 7, p. 2481–2486, 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.006>.

DASH, M. K.; PATRO, S. K.; RATH, A. K.. Sustainable use of industrial-waste as partial replacement of fine aggregate for preparation of concrete – A review. **International Journal of Sustainable Built Environment**, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 484–516, 2016. DOI: 10.1016/j.ijbe.2016.04.006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbe.2016.04.006>.

DE LA VILLA, R. V.; GARCÍA, R.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; FRÍAS, M. Effects of calcination temperature and the addition of ZnO on coal waste activation: A mineralogical and morphological evolution. **Applied Clay Science**, [S. l.], v. 150, n. May, p. 1–9, 2017. DOI: 10.1016/j.clay.2017.08.031.

DJELLALI, A.; LAOUAR, M. S.; SAGHAFI, B.; HOUAM, A. Evaluation of Cement-Stabilized Mine Tailings as Pavement Foundation Materials. **Geotechnical and Geological Engineering**, [S. l.], v. 37, n. 4, p. 2811–2822, 2019. DOI: 10.1007/s10706-018-00796-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10706-018-00796-8>.

DUVALLET, T. Y.; FROUIN, L.; ROBL, T. L.; OBERLINK, A. E.; JEWELL, R. B. Effect of particle packing and fly ash on performance of ordinary Portland cement/anhydrite-activated ground-granulated blast-furnace slag. **ACI Materials Journal**, [S. l.], v. 114, n. 4, p. 653–660, 2017. DOI: 10.14359/51689718.

EDRAKI, M.; BAUMGARTL, T.; MANLAPIG, E.; BRADSHAW, D.; FRANKS, D. M.; MORAN, C. J. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 84, n. 1, p. 411–420, 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.04.079.

FENG, Y.; YANG, Q.; CHEN, Q.; KERO, J.; ANDERSSON, A.; AHMED, H.;

ENGSTRÖM, F.; SAMUELSSON, C. Characterization and evaluation of the pozzolanic activity of granulated copper slag modified with CaO. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 232, p. 1112–1120, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.062.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos**. [s.l.: s.n.]. v. 53

Disponível em:

<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/245180/245180.pdf%0Ahttps://hdl.handle.net/20.500.12380/245180%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2011.03.003%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.gr.2017.08.001%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2014.12>.

FRANÇOIS, H.; ROUX, S. CORRELI: {A} software for displacement field measurements by digital image correlation. **Cachan: Ecole Normale Supérieure de Cachan**, [S. l.], n. 254, 2008.

GALLALA, W.; HAYOUNI, Y.; GAIED, M. E.; FUSCO, M.; ALSAIED, J.; BAILEY, K.; BOURHAM, M.. Mechanical and radiation shielding properties of mortars with additive fine aggregate mine waste. **Annals of Nuclear Energy**, [S. l.], v. 101, p. 600–606, 2017. DOI: 10.1016/j.anucene.2016.11.022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2016.11.022>.

GERAB, A. T. F. S. C. **UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO GROSSO DO BENEFICIAMENTO DA SCHEELITA EM APLICAÇÕES RODOVIÁRIAS**. Natal.

GONDIM, T. F.; DURANTE, P.; NETO, O. F.; FRANCISCO, O. Potencialidade de uso do resíduo da scheelita em sistemas de cobertura de aterro de resíduos Potential use of scheelite mining residue in landfill cover systems. [S. l.], p. 597–606, 2022.

GOU, M.; ZHOU, L.; THEN, N. W. Y. Utilization of tailings in cement and concrete: A review. **Science and Engineering of Composite Materials**, [S. l.], v. 26, n. 1, p. 449–464, 2019. DOI: 10.1515/secm-2019-0029.

GUILHERME, D. D. P.; CABRAL, K. C.; DE SOUZA, W. R. M. Study of the use of expanded vermiculite in the mechanical properties of light mortars. **Revista Materia**, [S. l.], v. 25, n. 4, p. 1–10, 2020. DOI: 10.1590/S1517-707620200004.1194.

HASSAN, G. M. **Deformation measurement in the presence of discontinuities with digital image correlation: A review** *Optics and Lasers in Engineering*, 2021. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106394.

HEMALATHA, M. S.; SANTHANAM, M. Characterizing supplementary cementing materials in blended mortars. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 191, p. 440–459, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.208. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.208>.

INCE, C. Reusing gold-mine tailings in cement mortars: Mechanical properties and socio-economic developments for the Lefke-Xeros area of Cyprus. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 238, p. 117871, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117871. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117871>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. Setor mineral 2021. [S. l.], v. 1, p. 41, 2022. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/>.

JACOBY, P. C.; PELISSER, F. Pozzolanic effect of porcelain polishing residue in

Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 100, p. 84–88, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.03.096. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.096>.

KINNUNEN, P. H. M.; KAKSONEN, A. H. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 228, p. 153–160, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.171.

KIVENTERÄ, J.; LANCELLOTTI, I.; CATAURO, M.; POGGETTO, F. D.; LEONELLI, C.; ILLIKAINEN, M.. Alkali activation as new option for gold mine tailings inertization. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 187, p. 76–84, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.182.

KWAN, A. K. H.; FUNG, W. W. S. Packing density measurement and modelling of fine aggregate and mortar. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 31, n. 6, p. 349–357, 2009. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.03.006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.03.006>.

LÈBRE, E.; CORDER, G.; GOLEV, A. The Role of the Mining Industry in a Circular Economy: A Framework for Resource Management at the Mine Site Level. **Journal of Industrial Ecology**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 662–672, 2017. DOI: 10.1111/jiec.12596.

LIU, J.; MAO, J.; YE, H.; ZHANG, W. Geology, geochemistry and age of the Hukeng tungsten deposit, Southern China. **Ore Geology Reviews**, [S. l.], v. 43, n. 1, p. 50–61, 2011. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2011.09.004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.09.004>.

LIU, M. Y. J.; ALENGARAM, U. J.; JUMAAT, M. Z.; MO, K. H. Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete. **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 72, p. 238–245, 2014. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.12.029. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.029>.

MATIAS, G.; FARIA, P.; TORRES, I. Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 73, p. 125–136, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.028. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.028>.

MEDEIROS, A. G.; GURGEL, M. T.; SILVA, W. G.; OLIVEIRA, M. P.; FERREIRA, R. L. S.; LIMA, F. J. N. Evaluation of the mechanical and durability properties of eco-efficient concretes produced with porcelain polishing and scheelite wastes. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 296, p. 123719, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123719. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123719>.

MEDEIROS, B. A.; NEVES, G. A.; BARBOSA, N. P.; MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. C. Mechanical properties of mortar produced with the replacement of natural sand by scheelite residue. **Cerâmica**, [S. l.], v. 65, n. 375, p. 443–451, 2019. DOI: 10.1590/0366-69132019653752571.

MEDINA, C.; FRÍAS, M.; ROJAS, M. I. S Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, p. 112–118, 2012.

MENDES, J. C.; BARRETO, R. R.; DE PAULA, A. C. B. ; ELÓI, F. P. F.;

BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F. On the relationship between morphology and thermal conductivity of cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 104, n. May, p. 103365, 2019. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103365. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103365>.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Boletim do Setor Mineral. **Boletim do Setor Mineral**, [S. l.], v. 1, p. 1–28, 2019.

NASCIMENTO, R. F.; ANDRADE, S. S. F.; DIAS, L. S. ; DAMACENO, H. L.; BESERRA, A. V. S.; LIMA, D. A.; BEZERRA, D. P.; CLAUDINO, C. M. A.; OLIVEIRA, J. L. P. Viabilidade de incorporação de resíduo de scheelita em argamassa. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 431–439, 2021. DOI: 10.6008/cbpc2179-6858.2021.003.0035.

NETA, M. L. X. F.; BARROS, S. V. A.; DANTAS, G. C. B.; MELO, S. B.; NEVES, G. A.; SANTOS, V. S.; SILVA, W. G. Avaliação da reatividade ao ataque químico de resíduo oriundo da mineração da scheelita utilizado como agregado em argamassas cimentícias. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S. l.], v. 26, n. 6, p. 1135–1142, 2021. DOI: 10.1590/s1413-415220200183.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. 2º ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2010.

NOURREDINE, G.; KERDAL, D. E.; NOURIA, K.; RACHIDA, I. Potential use of activated Algerian natural pozzolan powder as a cement replacement material. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, [S. l.], v. 0, n. 0, p. 1–21, 2019. DOI: 10.1080/19648189.2018.1559241. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1559241>.

OLIVEIRA, C. O. E.; MACIEL, G. F.; DE CASTRO, A. L.; BARBOSA, M. P.; CAMPOS, R. S. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Revista Materia**, [S. l.], v. 23, n. 1, 2018. DOI: 10.1590/s1517-707620170001.0298.

PAN, B. Digital image correlation for surface deformation measurement: Historical developments, recent advances and future goals. **Measurement Science and Technology**, [S. l.], v. 29, n. 8, 2018. DOI: 10.1088/1361-6501/aac55b.

PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P.; MIKOWSKI, A. Propriedades nanomecânicas do silicato de cálcio hidratado de síntese. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 129–139, 2009. DOI: 10.1590/s1678-86212009000400523.

PENG, K.; L. V, C.; YANG, H. Novel preparation of glass ceramics from amorphized tungsten tailings. **Ceramics International**, [S. l.], v. 40, n. 7 PART B, p. 10291–10296, 2014. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.02.121. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.02.121>.

PENG, K.; YANG, H.; OUYANG, J. Tungsten tailing powders activated for use as cementitious material. **Powder Technology**, [S. l.], v. 286, p. 678–683, 2015. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.09.012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.09.012>.

PETTA, R. A.; SINDERN, S.; SOUZA, R. F.; CAMPOS, T. F. C. Influence of mining activity on the downstream sediments of scheelite mines in Currais Novos (NE Brazil).

Environmental Earth Sciences, [S. l.], v. 72, n. 6, p. 1843–1852, 2014. DOI: 10.1007/s12665-014-3093-0.

PICANÇO, M. S.; ANGÉLICA, R. S.; BARATA, M. S. Atividade polânica de arenito zeolítico da região Nordeste do Brasil. **Revista Escola de Minas**, [S. l.], v. 65, n. 2, p. 161–167, 2012.

QUANJIN, M.; REJAB, M. R. M.; HALIM, Q.; MERZUKI, M. N. M.; DARUS, M. A. H. Experimental investigation of the tensile test using digital image correlation (DIC) method. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 27, p. 757–763, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.072.

SAEDI, A.; JAMSHIDI-ZANJANI, A.; DARBAN, A. K. A review on different methods of activating tailings to improve their cementitious property as cemented paste and reusability. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 270, n. February, p. 110881, 2020. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110881. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110881>.

SAHA, A. K.; SARKER, P. K.; GOLOVANEVSKIY, V. Thermal properties and residual strength after high temperature exposure of cement mortar using ferronickel slag aggregate. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 199, p. 601–612, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.068. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.068>.

SAMEER, H.; BRINGEZU, S. Life cycle input indicators of material resource use for enhancing sustainability assessment schemes of buildings. **Journal of Building Engineering**, [S. l.], v. 21, p. 230–242, 2019. DOI: 10.1016/j.job.2018.10.010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.10.010>.

SÁNCHEZ, I.; SOTO, I. S.; CASAS, M.; VIGIL DE LA VILLA, R.; GARCÍA-GIMÉNEZ, R. Evolution of Metakaolin Thermal and Chemical Activation from Natural Kaolin. **Minerals**, [S. l.], v. 10, n. 6, p. 534, 2020. DOI: 10.3390/min10060534.

SANTOS, A. R.; VEIGA, M. R.; SANTOS SILVA, A.; DE BRITO, J.; ÁLVAREZ, J. I. Evolution of the microstructure of lime based mortars and influence on the mechanical behaviour: The role of the aggregates. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 187, p. 907–922, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.223. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.223>.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. 1. ed. New York: CRC Press, 2016.

SEDIRA, N.; CASTRO-GOMES, J.; MAGRINHO, M. Red clay brick and tungsten mining waste-based alkali-activated binder: Microstructural and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 190, p. 1034–1048, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.153. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.153>.

SHAFIGH, P.; MAHMUD, H. B.; JUMAAT, M. Z.; ZARGAR, M. Agricultural wastes as aggregate in concrete mixtures - A review. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 53, p. 110–117, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.074. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.074>.

SHANKS, W.; DUNANT, C. F.; DREWNIOK, Michał P.; LUPTON, R. C.;

- SERRENHO, A.; ALLWOOD, Julian M. How much cement can we do without? Lessons from cement material flows in the UK. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 141, n. November 2018, p. 441–454, 2019. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.11.002.
- SHETTIMA, A. U.; HUSSIN, M. W.; AHMAD, Y.; MIRZA, J. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 120, p. 72–79, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095>.
- SILVA, A. L. A.; BATISTA, L. S.; SILVA, S.; ANDRADE, F.; PALOMA, J.; LEAL, C.; COSTA, D. B. Estudo Da Reutilização Do Rejeito De Scheelita Em Substituição Do Agregado Miúdo Na Composição De Misturas Asfálticas. **2º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**, [S. l.], p. 1–8, 2019.
- SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Consumo aparente de cimento por regiões e estados**. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1657726246.pdf>. Acessado em: 10 de ago. 2022.
- SOKOLOVICZ, B. C. Avaliação das propriedades mecânicas e microestruturais de concreto de ultra alto desempenho com adições minerais e resíduos industriais. 2020, 358 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/19866>. Acesso em: 10 de ago. de 2022.
- SOUZA, M. H. O.; NETA, M. L. X. F.; BARROS, S. V. A.; DANTAS, G. C. B.; NEVES, G. A.; CARTAXO, J. M.; PIMENTEL, P. M. Influência do tipo de cura no comportamento mecânico de argamassas confeccionadas com areia de scheelita. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 91–94, 2019.
- TRENTIN, P. O.; MANICA, J.; VANZETTO, S. C.; MARANGONI, B.; ZALESKI, A. Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa Partial replacement of small aggregate by ground glass residue in the production of mortar. [S. l.], 2020.
- XAVIER, L. N. Reinterpretação conceitual do desenvolvimento sustentável em face do planejamento urbano e da economia circular. **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 233, 2017. DOI: 10.7213/rev.dir.econ.soc.v8i1.17691.
- YAGÜE, S.; SÁNCHEZ, I.; DE LA VILLA, R. V.; GARCÍA-GIMÉNEZ, R.; ZAPARDIEL, A.; FRÍAS, M. Coal-mining tailings as a pozzolanic material in cements industry. **Minerals**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 1–13, 2018. DOI: 10.3390/min8020046.
- YANGUATIN, H.; RAMÍREZ, J. H.; TIRONI, A.; TOBÓN, J. I. Effect of thermal treatment on pozzolanic activity of excavated waste clays. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 211, p. 814–823, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.300. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.300>.
- YIN, C.; JI, L.; CHEN, X.; LIU, X.; ZHAO, Z. Efficient leaching of scheelite in sulfuric acid and hydrogen peroxide solution. **Hydrometallurgy**, [S. l.], v. 192, n. April 2019, p. 105292, 2020. DOI: 10.1016/j.hydromet.2020.105292. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105292>.

YOON, S.; JUNG, H. J.; KNOWLES, J. C.; LEE, H. H. Digital image correlation in dental materials and related research: A review. **Dental Materials**, [S. l.], v. 37, n. 5, p. 758–771, 2021. DOI: 10.1016/j.dental.2021.02.024.

ZHANG, X.; CHANG, W.; ZHANG, T.; ONG, C. K. Nanostructure of calcium silicate hydrate gels in cement paste. **Journal of the American Ceramic Society**, [S. l.], v. 83, n. 10, p. 2600–2604, 2000. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2000.tb01595.x.