



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE CIÊNCIA
E ENGENHARIA DOS MATERIAIS



Brunna Lima de Almeida Victor Medeiros

**ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM RESÍDUO DE SCHEELITA: PROPRIEDADES
MECÂNICAS, DURABILIDADE E MICROESTRUTURA**

Orientador: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Orientador Externo: Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa

Campina Grande – PB

2019

Brunna Lima de Almeida Victor Medeiros

**ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM RESÍDUO DE SCHEELITA: PROPRIEDADES
MECÂNICAS, DURABILIDADE E MICROESTRUTURA**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da UFCG, como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais.**

Orientador: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Orientador Externo: Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa

Agência Financiadora: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal e Nível Superior (CAPES)

Campina Grande – PB

2019

M488a Medeiros, Brunna Lima de Almeida Victor.
Argamassas produzidas com resíduo de scheelita: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura / Brunna Lima de Almeida Victor Medeiros. – Campina Grande, 2019.
97 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.
"Orientação: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves, Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa".
Referências.

1. Reciclagem. 2. Resíduos Industriais. 3. Agregados. 4. Reatividade. I. Neves, Gelmires de Araújo. II. Barbosa, Normando Perazzo. III. Título.

CDU 628.4.036(043)

VITAE DO CANDIDATO

- Arquiteta e Urbanista pela UFPB (2007).
- Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental pela UFPB (2012).
- Servidora Técnico-Administrativa no cargo de Desenhista-projetista na UFPB (2003-2013).
- Professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico do IFPB (2012-atual).

Brunna Lima de Almeida Victor Medeiros

**ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM RESÍDUO DE SCHEELITA: PROPRIEDADES
MECÂNICAS, DURABILIDADE E MICROESTRUTURA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de **Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais**.

Aprovado em: 17/04/2019


Dr. Gelmir de Araújo Neves
Orientador

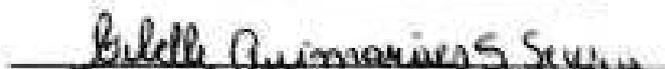
PPG-CEMat/UAEMA/UFCG


Dr. Normando Perazzo Barbosa
Orientador Externo

CT/DECA-UFPB


Dr. Romualdo Rodrigues Monizes
Examinador Interno

PPG-CEMat/UAEMA/UFCG


Dr.ª Cibele Guimarães Silva Severo
Examinadora Externa

CGTA/UCTA-UFCG


Dr.ª Lisiane Navarro de Lima Santana
Examinadora Interna

PPG-CEMat/UAEMA/UFCG


Dr.ª Sâmia Valenica Alves Barros
Examinadora Externa

DENGE/UFERSA

*A todos que sofrem diariamente com conflitos psicológicos entre uma suposta incompetência e a certeza de ter feito um bom trabalho.
“A vida é maior que o Lattes”.*

AGRADECIMENTOS

Aos professores Gelmires e Perazzo que souberam conduzir a orientação deste trabalho além dos limites institucionais, provocando por diversas vezes o conforto necessário para a esta dura caminhada.

Aos colegas de laboratório Adriano, José Augusto e Maviael, nossa equipe é a melhor.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais da UFPB Evelyne, Delby, Sebastião, Claudio, Otoniel por todo apoio e suporte nos ensaios.

A todos terceirizados que auxiliaram na parte pesada do trabalho prático, em especial a Ricardo e Miso, dois profissionais na área com quem aprendi bastante.

Aos meus ex-alunos que atenderam ao pedido de ajuda e se prontificaram na etapa dos ensaios, Magna (hoje engenheira Magna), Hiltinho (futuro arquiteto José Hilton), Jerfferson (futuro arquiteto Jerfferson Leandro) e Bremmer (engenheiro e futuro mestre em Engenharia de materiais).

À CAPES pelo apoio financeiro para a realização do doutorado sanduíche.

Ao Centro Australiano de Microscopia e Microanálises (ACMM) da Universidade de Sydney, na pessoa do professor Simon Ringer pelo acolhimento e treinamento durante o período de sanduíche.

A minha filha, Ana Clara, que sempre soube entender os momentos que fui ausente para atender às necessidades da pesquisa e que, no auge de sua maturidade de 14 anos, enxugava minhas lágrimas e me pedia calma.

Impossível não agradecer aquele que sempre esteve ao meu lado, desde o momento do resultado da seleção até a impressão final deste texto, meu esposo Ramon Medeiros.

RESUMO

A geração de resíduos no setor industrial é uma problemática que vem sendo acompanhada pelo crescimento econômico do setor. Apresentar soluções e alternativas que minimizem o impacto ambiental causado pela forma incorreta da destinação final destes resíduos tem sido cada vez mais uma preocupação dos produtores. Por meio de pesquisas sobre materiais não-convencionais, o setor da construção civil tem conseguido absorver essa demanda por alternativas sustentáveis. Esta pesquisa teve como objetivo analisar as propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura de argamassa de revestimento produzida com a incorporação de resíduos provenientes da indústria de beneficiamento de Scheelita. A fim de identificar os potenciais de uso das matérias-primas alternativas, realizou-se a caracterização deste resíduo através das seguintes técnicas: granulometria, massa específica real e unitária, difração de raio X, termogravimetria, análise química por fluorescência de raios x e espectrometria por absorção atômica. Após os ensaios de caracterização, foram definidos os traços, e com os melhores resultados de desempenho mecânica destes traços foram determinadas as seguintes propriedades: absorção de água, potencial de aderência a tração, durabilidade pelos métodos de molhagem e secagem. A reação álcali-agregado foi investigada por teste de expansão de barra pelo método acelerado e por meio da análise de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por espectroscopia por energia dispersiva (EDS). Nos resultados do ensaio de expansão de barras, foram identificadas expansões que indicavam reatividade do resíduo. As imagens obtidas por MEV e EDS não revelaram a presença de formação de nenhum gel deletério, porém mostraram a ocorrência de fissuras que corroboram com os resultados obtidos no ensaio de expansão. A ausência do gel sugere uma reação do tipo álcali-carbonato, devido a forte presença de calcita nas amostras. Assim, foi possível concluir que o resíduo pode apresentar reatividade com os componentes do cimento, podendo ser utilizado como substituto da areia normal na produção de argamassa de revestimento, desde que o cimento utilizado na argamassa possa inibir essas reações.

Palavras-chaves: Reciclagem. Resíduos Industriais. Agregados. Reatividade.

ABSTRACT

The generation of waste in the industrial sector is a problem that has been followed by the economic growth of the sector. Presenting solutions and alternatives that minimize the environmental impact caused by the incorrect way of disposal of these wastes has been increasingly a concern of the producers. Through research on non-conventional materials, the construction industry has been able to absorb this demand for sustainable alternatives. This research had as objective to analyze the mechanical properties and durability of coating mortar produced with the incorporation of residues from the Scheelite beneficiation industry. In order to identify the potentials for the use of alternative raw materials, this residue was characterized by the following techniques: granulometry, specific and unit mass, X-ray diffraction, thermogravimetry, X-ray fluorescence chemical analysis and spectrometry by absorption. After the characterization tests, compositions were defined and, with the best results of mechanical performance of these compositions, were determined the following properties: water absorption, traction adhesion potential, durability by wet and dry cycles method. The alkali-aggregate reaction was investigated by the bar expansion test by the accelerated method and through analysis of images obtained by scanning electron microscopy (SEM) and by dispersive energy spectroscopy (EDS). In the results of the bar expansion test, expansions were identified that indicated residue reactivity. The images obtained by MEV and EDS did not reveal the presence of formation of any deleterious gel, but they showed the occurrence of cracks that corroborate with the results obtained in the expansion test. The absence of the gel suggests an alkali-carbonate reaction due to the strong presence of calcite in the samples. Thus, it was possible to conclude that the residue can presents reactivity with the cement components and can be used as a substitute for normal sand in the production of coating mortar, provided that the cement used in the mortar can inhibit these reactions.

Keywords: Recycling. Industrial Waste. Aggregates. Reactivity. Microstructure.

PUBLICAÇÕES

MEDEIROS, B. L. de A. V.; BARBOSA, N. P.; NEVES, G. A. Mechanical properties of mortar produced with replacement of natural sand by Scheelite residue. **Cerâmica**, 2019.

MEDEIROS, B. L. de A. V.; BARBOSA, N. P.; NEVES, G. A. Properties of Mortar Produced with Tungsten Mining Waste. In: **6th Amazon & Pacific Green Materials Congress and Sustainable Construction Materials LAT-RILEM Conference**. Cali, Colombia. 2016.

MEDEIROS, B. L. de A. V.; SIQUEIRA, M. P.; SOUTO, B. C. C; FELIX, A. S.; BARBOSA, N. P.; NEVES, G. A. Substituição da areia natural por resíduo da indústria da mineração como agregados na produção de microconcreto. In: **II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis**. João Pessoa, PB – Brasil, 2016.

MEDEIROS, B. L. de A. V; SIQUEIRA, M. P.; AZEREDO, A. F. N.; SILVA, J. M. C.; FELIX, A. S. Produção de bloco prensado com resíduo industrial. In **XI Congresso Norte-nordeste de Pesquisa e Inovação**. Maceió, Alagoas, 2016.

Medeiros, B. L. de A. V; SIQUEIRA, M. P.; TORRES, I. L. Resíduo da indústria da mineração como agregado na produção de blocos prensados. In: **Simpósio de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação do IFPB**. João Pessoa, PB, 2015.

MEDEIROS, B. L. de A. V. Identificação mineralógica através do Difratoograma de uma amostra de caulim. In: **X Congresso Norte-nordeste de Pesquisa e Inovação**. Rio Branco, Acre, 2015.

MEDEIROS, B. L. de A. V.; LIMA, E. E. P.; NOBREGA, L. A.; SIQUEIRA M. P.; FELIX, A. S. Parâmetros granulométricos de uma amostra de caulim por análise em micrografia obtida no microscópio eletrônico de transmissão. In: Sobrinho Junior, A. S. et al (Org.). **Engenharia Civil – Temas, Técnicas e Aplicações**. Unipê. João Pessoa: Centro Universitário de João Pessoa. P. 406-420, 2015.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cristal de Scheelita de origem em Sichuan, na China (attminerals.com, 2016).	19
Figura 2: Localização do município de Currais Novos, RN (IBGE) e sede da Indústria de Mineração Tomaz Salustino S/A.	20
Figura 3: Dunas de rejeito da Indústria da Mineração Tomaz Salustiano S/A.	20
Figura 4: Fluxograma do processo de beneficiamento da Mina Brejuí (Leite, 2007 apud Fernandes, 2011).	21
Figura 5: Diagrama ilustrativo de como a estrutura e o processo de fabricação de um agregado pode influenciar nas propriedades das argamassas (adaptado de Mehta e Monteiro, 2008).	25
Figura 6: Diferentes tamanhos de brita (blog.construir.arq.br)	26
Figura 7: Exemplos de agregado leve; argila expandida (argex.pt).	27
Figura 8: Exemplos de agregados naturais: areia fina (a esquerda) e areia média (a direita) (Modro et al, 2009).	27
Figura 9 – Evolução conceitual da visão dos parâmetros de análise dos projetos de concreto (Possan, 2010).	29
Figura 10: Fatores necessários para que ocorra a reação álcali-agregado. Ocorrência da reação na fundação de um pilar (imagem cedida pelo autor Tibério Andrade).....	32
Figura 11: Quantitativo de publicações existentes na base de dados da Science Direct acerca dos temas abordados.	34
Figura 13: Agregados produzidos com 150 µm e 250 µm e as diferentes fases cristalinas presentes, tais como CH (esquerda) e CSH (direita) (Evangelista, 2015).	38
Figura 12: Agregados produzidos com 1 e 4 mm (Evangelista et al, 2015).	38
Figura 14: Micrografia da amostra aos 90 dias com identificação dos pontos A (poro) e B (Portlandita) (Schackow et al, 2015).	39
Figura 15: Micrografia aos 180 dias do concreto com substituição (esquerda) e do concreto de referência (direita) (Aksogan, Bicini e Ortlek, 2016).....	40
Figura 16: Micrografia aumentada 250x do concreto com adição de metacaulim (Trafaoui, Escadeillas, & Vidal, 2016).	40
Figura 17: Fluxograma para caracterização dos materiais utilizados.	42
Figura 18: Fluxograma dos experimentos realizados na argamassa produzida.....	42
Figura 19: Processo de quarteamento da amostra.	43
Figura 20: Equipamentos utilizados para ensaio de massa específica (esquerda) e massa unitária (direita).	44
Figura 21: Amostras da argamassa produzida após o processo de embutimento.	47
Figura 22: Amostras do resíduo de Scheelita e da areia norma após o processo de recobrimento por ouro.	47
Figura 23: Resíduo de Scheelita após o processo de moagem.	48
Figura 24: Vista superior e lateral da forma prismática para corpos de prova de argamassa (NBR 13279, 2005).....	52

Figura 25: Esquema dos apoios do corpo e prova para ensaio de resistência à tração na flexão (NBR 13279, 2005).	54
Figura 26: Esquema para realização do ensaio de aderência à tração.	57
Figura 27: Distribuição granulométrica das amostras do resíduo de Scheelita e de uma amostra de areia normal.	62
Figura 28: Análise Térmica do Resíduo da Scheelita no estado natural.	63
Figura 29: DRX do resíduo de Scheelita no estado natural.	65
Figura 30: MEV dos grãos de areia normal.	66
Figura 31: MEV dos grãos de resíduo de Scheelita.	66
Figura 32: MEV bordas do grão do resíduo de Scheelita.	67
Figura 33: Resultado do ensaio de atividade pozolânica.	69
Figura 34: Argamassa ao atingir o espalhamento recomendado de 260 mm.	70
Figura 35: Resultados de ensaios de densidade no estado fresco.	71
Figura 36: Densidade no estado endurecido corpos de prova incorporados com resíduos após cura de 28 dias.	72
Figura 37: Antes e depois dos corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão.	74
Figura 38: Absorção por capilaridade medido aos 10 e aos 90 minutos.	75
Figura 39: Valor acumulado da porosimetria na argamassa com 0% de substituição (amostra A) e com 100% de substituição (amostra B).	76
Figura 40: Alvenaria utilizada para ensaio de potencial de aderência à tração.	77
Figura 41: Corpos de prova submetidos ao ensaio de aderência.	78
Figura 42: Detecção da área de ruptura no substrato.	78
Figura 43: Resultado do desempenho mecânico da argamassa após os ciclos.	78
Figura 44: Perda de massa em relação aos ciclos.	78
Figura 45: Frações do resíduo com diferentes granulometrias para o ensaio de expansão de barras.	78
Figura 46: Variação da expansão e as faixas que representam a reatividade do material.	78
Figura 47: MEV de amostra de argamassa com a identificação de cristais de Hidróxido de Cálcio (C-H).	78
Figura 48: MEV de amostra de argamassa com a identificação de vazios sem a presença de géis deletérios.	78
Figura 50: Elementos presentes na região delimitada.	78
Figura 49: MEV da argamassa com resíduos de Scheelita com fissuras do processo deletério.	78
Figura 51: Elementos presentes no ponto localizado na fissura.	78
Figura 52: Elementos presentes no ponto localizado sobre o agregado.	78
Figura 53: Gráfico comparativo entre os dois pontos indicados.	78
Figura 54: Mapeamento dos elementos existentes na região delimitada.	78
Figura 55: Mapeamento por EDS identificando os elementos presentes.	78
Figura 56: Presença de fissura tanto na pasta de cimento quanto no agregado	78
Figura 58: Mapeamento da sílica e do alumínio presentes na região.	78
Figura 57: Elementos presentes na região da fissura (2017).	78

Figura 59: Presença de fissura na zona de transição.	78
Figura 60: Elementos presentes na região da fissura.	78
Figura 61: Mapeamento da sílica, sódio e do carbono presentes na região.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de argamassas segundo sua função.....	22
Tabela 2 – Classificação das argamassas.....	22
Tabela 3 – Principais tipos de cimento fabricados no Brasil.....	23
Tabela 4: Exigências químicas e físicas para classificação das cales.....	24
Tabela 5: Impurezas dos agregados e as consequências nas argamassas de revestimento.....	29
Tabela 6: Tipos de rochas e os minerais potencialmente reativos.....	31
Tabela 7 – Traço em volume e em massa das argamassas produzidas.....	50
Tabela 8: Granulometria requerida do resíduo para o ensaio.....	58
Tabela 9: Distribuição granulométrica do resíduo de Scheelita.....	61
Tabela 10: Resultados de análise granulométrica e massa específica e unitária do resíduo de Scheelita.....	62
Tabela 11: Composição química do resíduo de Scheelita.....	64
Tabela 12: Resultado da análise de espectrometria por absorção atômica.....	67
Tabela 13: Resistência à compressão de corpos de prova submetidos aos ensaios de atividade pozolânica.....	68
Tabela 14: Exigências para classificar um material como pozolânico.....	69
Tabela 15: Quantidade em massa (g) de cada material utilizado na composição dos diferentes traços da argamassa.....	71
Tabela 16: Densidades e teores de ar encontrados para cada traço.....	72
Tabela 18: Resistência à tração na flexão e compressão axial aos 7 e 28 dias de cura.....	73
Tabela 19: Absorção por capilaridade dos corpos de prova incorporados com resíduos após cura de 7 e 28 dias.....	75
Tabela 20: Resultados de resistência de aderência à tração e o tipo de ruptura.....	77

LISTA DE SÍMBOLOS

MEV - microscopia eletrônica de varredura

EDS - espectroscopia por energia dispersiva

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

IBRACON - Instituto Brasileiro de Concreto

ABMS - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos

ACI - *American Concrete Institute*

FIB - *Fédération Internationale Du Béton*

RILEM - *International Union o Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*

ISO - *International Standards Organization*

RAA - reação álcali-agregado

RAS - reações álcali-sílica

RASS - álcali-silicato

RAC - reação álcali-carbonato

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

LABGER-UFCG - Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos da Universidade Federal de Campina Grande

FUNMINERAL - Laboratório de Análises Químicas da Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Científico e Tecnológico e de Agricultura, Pesca e Irrigação do estado de Goiás

FRX - fluorescência de raio X

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Resíduos Sólidos.....	18
2.2 Scheelita	19
2.3 Argamassa	21
2.3.1 Classificação	22
2.3.2 Aglomerantes	23
2.3.3 Agregados	25
2.3.3.1 Classificação	26
2.3.3.2 Minerais presentes nos agregados	27
2.4 Durabilidade em argamassas e concretos	28
2.4.1 Reação de álcalis	31
2.5 Estado da arte	35
2.5.1 Resíduos industriais utilizados na construção civil	34
2.5.2 Durabilidade	35
2.5.3 Análise microestrutural	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 Materiais	41
3.1.1 Resíduo de Scheelita	41
3.1.2 Cimento	41
3.1.3 Cal	41
3.1.4 Areia	41
3.2 Métodos	42
3.2.1 Caracterização física dos materiais	43

3.2.1.1 Granulometria	44
3.2.1.2 Massa específica e Massa Unitária	44
3.2.2 Classificação ambiental do resíduo (ABNT NBR 10004/2004)	44
3.2.3 Caracterização química e mineralógica dos materiais e das misturas ...	45
3.2.3.1 Fluorescência de raio X	45
3.2.3.2 Difração de raio X	45
3.2.3.3 Termogravimetria	46
3.2.3.4 Microscopia eletrônica de varredura	46
3.2.4 Atividade pozolânica	47
3.2.5 Preparo das misturas	49
3.2.6 Ensaio de argamassa no estado fresco	50
3.2.6.1 Índice de consistência	50
3.2.6.2 Densidade e teor de ar incorporado	50
3.2.7 Ensaio de argamassa no estado endurecido	52
3.2.7.1 Densidade de massa aparente	52
3.2.7.2 Resistência à tração na flexão	53
3.2.7.3 Resistência à compressão	54
3.2.7.4 Absorção de água e coeficiente de capilaridade e porosimetria	55
3.2.7.5 Potencial de aderência a tração	56
3.2.7.6 Ciclos de molhagem e secagem	58
3.2.7.7 Reação álcali-agregado	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1 Caracterização dos materiais	61
4.1.1 Análise física	61
4.1.2 Análise térmica	63
4.1.3 Análise química e mineralógica	64

4.1.4 Microscopia eletrônica e varredura	66
4.1.5 Análise ambiental (ABNT 10004/2004)	67
4.1.6 Atividade pozolânica	68
4.2 Resultados dos ensaios de argamassa no estado fresco	70
4.2.1 Índice de consistência	70
4.2.2 Densidade e teor de ar incorporado	70
4.3 Resultados dos ensaios de argamassa no estado endurecido	72
4.3.1 Densidade de massa aparente	72
4.3.2 Resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial	73
4.3.3 Resultado das Ensaio de Absorção por capilaridade e porosimetria	74
4.3.4 Potencial de aderência à tração	76
4.3.5 Ciclos de molhagem e secagem	79
4.3.6 Reação álcali-agregado	80
5 CONCLUSÃO.....	90
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

1 INTRODUÇÃO

A produção dos setores industriais, geralmente, tem como consequência alguma agressão ao meio ambiente, devido à geração de resíduos. Ultimamente, a geração de resíduos no setor industrial tem aumentado bastante e tem sido proporcional ao crescimento econômico do setor. Por outro lado, o setor da construção civil destaca-se pelo grande potencial para absorver vários tipos de resíduos industriais, podendo contribuir assim para a preservação do meio ambiente.

As constantes mudanças no processo de produção de materiais da construção civil vêm favorecendo o desenvolvimento de materiais não-convencionais neste setor. Os resíduos gerados pelas atividades industriais são de responsabilidade de seus geradores que são obrigados a cuidar do gerenciamento, transporte, tratamento e destinação final. É nesse contexto que os conceitos de resíduo e rejeito se diferem, o resíduo pode ser trabalhado para se obter outras funções tanto na reutilização como na reciclagem, já o rejeito é caracterizado como não utilizável.

Com o objetivo de atingir a sustentabilidade na construção civil é de fundamental importância o desenvolvimento de soluções projetuais que minimizem os impactos ambientais e maximizem a conservação dos recursos naturais decorrentes do uso e da produção destes objetos. As técnicas construtivas utilizadas na construção civil estão referenciadas a períodos em que a preocupação com o meio ambiente não era um assunto prioritário. Processos que ignoram as necessidades de adequação às questões ambientais são aplicáveis frequentemente na construção civil. Diante deste contexto, pesquisas em diversos setores veem sendo desenvolvidas buscando soluções que minimizem estes fatos. Entretanto, deve ser salientado que a utilização de matérias primas alternativa traz grandes benefícios ambientais e financeiros, evitando o transporte de matéria prima e os custos decorrentes, assim sendo a utilização dos resíduos da mineração acarretaria soluções para os destinos finais deste material geralmente descartado de forma inadequada ao meio ambiente.

A motivação desta pesquisa foi lançar uma alternativa ambientalmente correta e tecnicamente viável para o destino final desses resíduos, bem como reduzir a exploração de areia natural. Durante a pesquisa, identificou-se que os resíduos produzidos pela exploração da Scheelita nas minas visitadas, são depositados de forma inadequada no meio ambiente há vários anos, o que ocasionou o aparecimento

de dunas com toneladas de resíduos dos arredores das mineradoras gerando grande impacto ambiental. Conforme relatado anteriormente, o resíduo se difere do rejeito por ainda deter capacidade de aproveitamento, é a partir deste conceito que se propõe a aplicação do resíduo da Scheelita numa tentativa de diminuição da extração da areia de fontes naturais, incentivando cada vez mais setores como o da construção civil a buscarem alternativas às matérias-primas não renováveis.

Em relação à economia, a utilização de materiais reciclados ou reaproveitados em setores como o da construção civil representam uma atual preocupação com a questão da sustentabilidade, porém pode reverter frutos nas questões financeiras também. A preocupação com impostos e tarifas para a deposição dos resíduos produzidos, bem como a possibilidade de economia da planilha orçamentaria gera interesse por parte dos investidores em incentivar pesquisas que solucionem estes problemas. O que falta para comprovar a eficácia da utilização de agregados reciclados é a certeza sobre os ganhos reais dos construtores e a qualidade do produto produzido (Vieira e Dal Molin, 2014).

Novas tecnologias têm buscado desenvolver materiais mais sustentáveis, cujas fontes possam ser renováveis ou recicláveis. Porém esta preocupação com a utilização de materiais não-convencionais não é nova e já vem sendo adotada em vários países desenvolvidos. Existem três principais razões que motivam os países a reciclarem seus rejeitos industriais; primeiro, o esgotamento das reservas de matérias-primas confiáveis; o crescente volume de resíduos sólidos, que põem em risco a saúde pública e degradam os recursos naturais e, por fim, a necessidade de compensar o desequilíbrio provocado pelas altas do petróleo (Neves, Menezes e Ferreira, 2002).

Esta pesquisa teve como objetivo geral analisar as propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura de argamassa de revestimento produzida com a incorporação de resíduos provenientes da indústria de beneficiamento de Scheelita. Para viabilizar essa pesquisa foram definidos os seguintes objetivos específicos: Caracterizar os resíduos provenientes do beneficiamento da extração da Scheelita; Formular diferentes traços de argamassa de revestimento com o uso do resíduo e analisar o desempenho mecânico de cada um; realizar ensaios de durabilidade com a argamassa que apresentar melhor desempenho mecânico; avaliar a microestrutura da argamassa produzida através da análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados alguns estudos referentes a temas ligados à pesquisa. Primeiramente são apresentados alguns conceitos e definições com a finalidade de familiarizar o leitor interessado em engenharia e ciência dos materiais com o universo da engenharia civil.

2.1 Resíduos Sólidos

De acordo com Hoornweg (2013), em 2000, 2.9 bilhões de pessoas vivendo em área urbana (49% da população) produziram mais de 3 milhões de toneladas de resíduo sólido por dia, e até 2025 esse valor deve dobrar. Ainda segundo o autor, o problema do descarte do lixo é ainda mais evidente em cidades emergentes e cita grandes áreas de depósitos e aterros sanitários no mundo (Laogang em Shanga na China, Sudoknow em Seul, Bordo Poniente na Cidade do Mexico), inclusive o Jardim Gramacho no Rio de Janeiro.

A NBR 10.004 - Resíduos Sólidos (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente. A partir da classificação estipulada pela norma, o gerador de um resíduo pode facilmente identificar o potencial de risco do mesmo, bem como identificar as melhores alternativas para destinação final e/ou reciclagem. De acordo com esta norma os resíduos em três classes distintas: classe I (perigosos), classe II (não-inertes) e classe III (inertes).

Já em relação a classe II-B, a norma classifica como resíduos inertes, que são aqueles que, ao serem submetidos aos testes de solubilização, não têm nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água. Isto significa que a água permanecerá potável quando em contato com o resíduo. Muitos destes resíduos são recicláveis. Estes resíduos não se degradam ou não se decompõem quando dispostos no solo (se degradam muito lentamente). Estão nesta classificação, por exemplo, os entulhos de demolição, pedras e areias retirados de escavações.

Os resíduos da indústria da mineração estão classificados como resíduos inertes Classe IIB, passíveis de serem recicláveis.

2.2 Scheelita

A Scheelita (Figura 1) é um mineral pertencentes a classe dos tungstatos, com composição química representada por CaWO_4 (19,4% de CaO e 80,6% WO_3) e seu nome foi uma homenagem ao descobridor do Tungstenio, Honors Karl Wilhelm Scheele. A Scheelita possui brilho vítreo e adamantino e pode ser encontrada nas cores branca, verde, amarela e marrom (Dana, 1978). Segundo Fernandes (2011), a viabilidade desse material está na obtenção dos seguintes minerais: scheelita (CaWO_4), wolframita [$(\text{FeMn})\text{WO}_4$], a ferberita (FeWO_4), huebnerita (MnWO_4) e a powelita [$\text{Ca}(\text{MoW})\text{O}_4$].



Figura 1: Cristal de Scheelita de origem em Sichuan, na China (attminerals.com, 2016).

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2018), a China é o maior produtor, exportador e consumidor de Tungstênio, responsável por mais de 80% da produção mundial em 2015, ao lado da China estão o Vietnã (com 5.7%), Rússia (2.9%) e Canadá (2.0%). Ainda segundo o DNPM, no Brasil, em 2015, a produção do concentrado de tungstênio somou 690 toneladas, representando 0.5% da produção mundial e totalizando US\$ 10.3 milhões em exportação de produtos de tungstênio no mesmo ano.

O Rio Grande do Norte é o 4º produtor nacional de recursos minerais do Brasil (Silva et al, 2018). Ainda de acordo com os autores, duas grandes empresas são responsáveis por 90% dessa exploração e o restante é oriundo de 50 pequenos garimpos espalhados pela região do Seridó e parte da região Oeste do estado.

Segundo dados da indústria de mineração Tomaz Salustiano S/A, a Mina Brejuí, localizada no município de Currais Novos (Figura 2), iniciou suas atividades em 1943 com um auge na década de 70. Em 1997 chegou a interromper suas atividades, retornando suas atividades no ano de 2005.

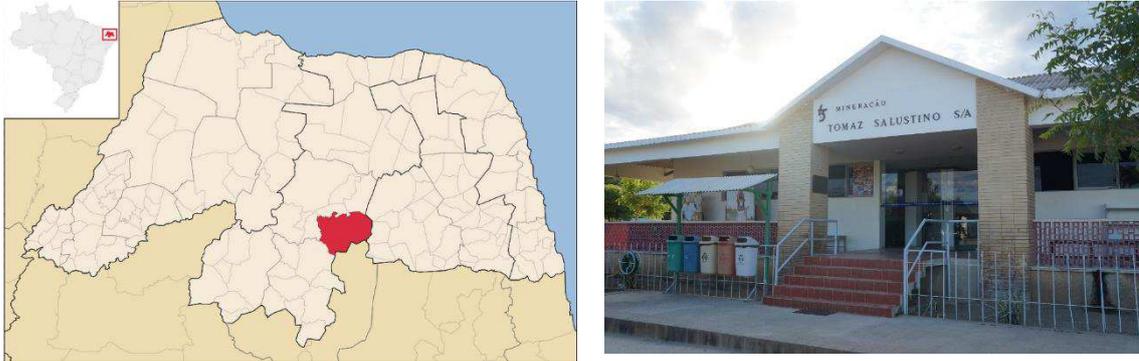


Figura 2: Localização do município de Currais Novos, RN (IBGE) e sede da Indústria de Mineração Tomaz Salustiano S/A.

A indústria de mineração Tomaz Salustiano é a principal empresa produtora de tungstênio do estado, representando 6.04% do total de todos os minerais comercializados no estado do Rio Grande do Norte (DNPM, 2017).

De acordo com Costa Filho (2017), o rejeito da mina Brejuí corresponde a aproximadamente 3.110.400 toneladas acumulados desde o início de suas atividades. As dunas formadas com o acúmulo desses resíduos podem ser vistas no entorno da cidade, conforme Figura 3.

O processo de beneficiamento adotado na Mina Brejuí segue o processo de separação gravimétrica, devido ao seu valor de massa específica. A falta de controle nos processos de britagem e moagem do minério acaba acarretado um volume elevado de finos, o que prejudica o processo de gravimetria (Fernandes, 2011).



Figura 3: Dunas de rejeito da Indústria da Mineração Tomaz Salustiano S/A.

A Figura 4 ilustra o fluxograma do processo de beneficiamento utilizado pela Mina Brejuí após a coleta do interior da mina. Esse processo de beneficiamento inclui a etapa de fragmentação com a britagem, hidratação e a etapa de concentração gravimétrica. O primeiro rejeito, proveniente da separação por diferença de densidade obtida no jigue, é um material grosso. Após a obtenção dessa separação, esse primeiro rejeito passa por uma nova mesa vibratória para obtenção de um segundo rejeito, o fino. A mineradora passou a reprocessar o resíduo após essa primeira triagem, pois constatou a existência de um percentual de Scheelita nesse resíduo (Paiva, 2013).

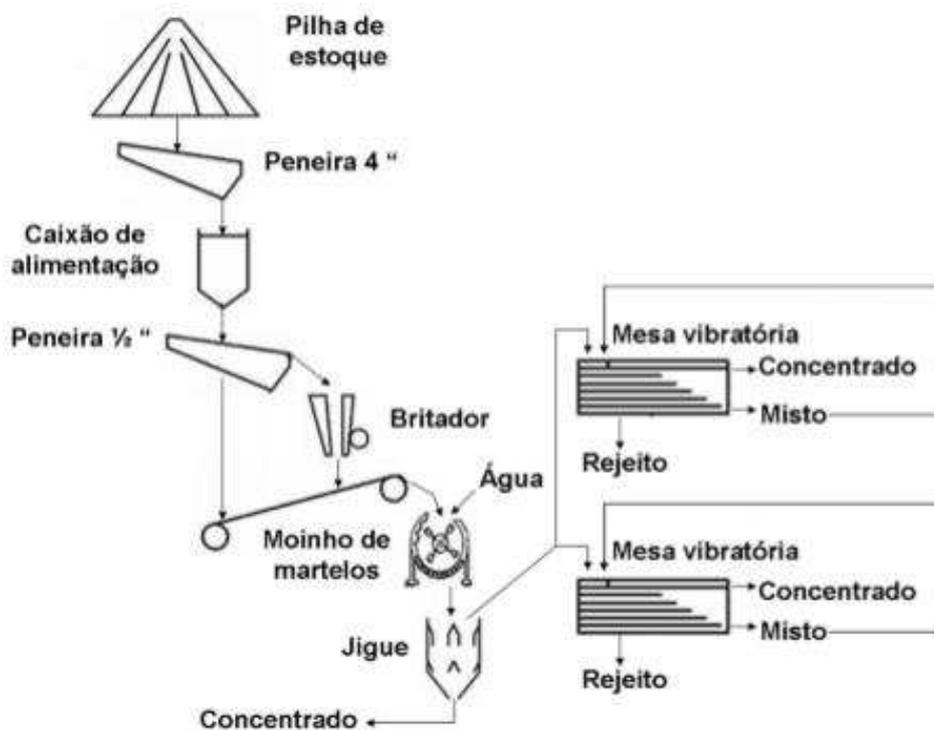


Figura 4: Fluxograma do processo de beneficiamento da Mina Brejuí (Leite, 2007 apud Fernandes, 2011).

2.3 Argamassa

A NBR 13281 (2005) define argamassas como uma mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerante e água, contendo ou não aditivos com propriedades de aderência e endurecimento.

2.3.1 Classificação

As argamassas são empregadas em diversas funções e a NBR 13281 (2005) também classifica as argamassas de acordo com sua aplicação. Os diferentes tipos de argamassas associados à sua função podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de argamassas segundo sua função.

Função	Tipo
Construção de alvenarias	Assentamento de blocos; Vedação (encunhamento);
Revestimento de parede e teto	Chapisco; Emboço; Reboco; Camada única;
Revestimento de piso	Contrapiso e piso de alta resistência;
Revestimentos cerâmicos	Assentamento (colante); Rejuntamento
Recuperação de estruturas	Argamassa de reparo;

Fonte: Adaptado de Carasek (2007).

Dentre os diferentes tipos de argamassa, sua classificação pode seguir diferentes critérios, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação das argamassas.

Critério	Classificação
Quanto à natureza do aglomerante	Aérea ou hidráulica;
Quanto ao tipo do aglomerante	Cal; Cimento; Mista de cal e cimento; Gesso; Mista de cal e gesso;
Quanto ao número do aglomerante	Simples ou mista;
Quanto à consistência	Seca, plástica ou fluida;
Quanto à plasticidade	Pobre ou magra; Média ou cheia; Rica ou gorda;
Quanto à densidade	Leve, normal ou pesada;
Quanto à preparação	Preparada na obra; Mistura semipronta; Industrializada; Dosada em central;

Fonte: Adaptado de (Carasek, 2007)

2.3.2 Aglomerantes

Conforme apresentado anteriormente, as argamassas podem ser classificadas de acordo com o tipo de aglomerante. Dentre os aglomerantes hidráulicos mais utilizados, o cimento Portland é o mais empregado na produção de argamassas de revestimento. Tanto os cimentos quanto as cales são aglomerantes considerados hidráulicos, pois precisam passar pelo processo de hidratação para resultar no seu endurecimento.

A matéria prima do cimento Portland é uma mistura de calcário e argila. Após calcinada essa mistura, forma-se o clínquer, que moído com 4% a 6% de gipsita forma o cimento Portland. A adição de outros materiais à composição do cimento torna -o um material composto classificado em diferentes tipos. Na Tabela 3 são apresentados os principais tipos de cimento Portland encontrados no Brasil, com suas diferentes adições, classe de resistências, norma técnica e principais uso, de acordo com a NBR 16697 (2018).

Tabela 3 – Principais tipos de cimento fabricados no Brasil.

Sigla	Resistencia à compressão aos 28 dias de idade	Adições	Principais usos
CPI	25, 32 ou 40 MPa	Sem adição	Construções que não exijam condições especiais. O gesso atua como retardador de pega.
CPI - S	25, 32 ou 40 MPa	Com adição de material pozolânico	Menor permeabilidade devido a presença da pozolana.
CPII – E	25, 32 ou 40 MPa	Com adição de escória de alto forno	Baixo calor de hidratação devido a presença da escoria.
CPII – Z	25, 32 ou 40 MPa	Com adição de material pozolânico	Menor permeabilidade, ideal para obras subterrâneas.
CPII – F	25, 32 ou 40 MPa	Com adição de material carbonático	Indicado para concreto armado e argamassas de revestimento. Não indicado para ambientes agressivos.
CPIII	25, 32 ou 40 MPa	Com adição de escoria de alto forno.	Baixo calor de hidratação, maior impermeabilidade e durabilidade. Indicado para obras de grande porte e em ambientes agressivos.
CPIV	25, 32 ou 40 MPa	Com adição de material pozolânico	Alta impermeabilidade e durabilidade. Resistencia mecânica superior a longo prazo.

		Indicado para ambientes com água corrente e agressivos.
CPV – ARI	Alta resistência inicial, com 14 Mpa a 1 dia de idade	Indicado para obras com a necessidade de desforma rápida

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (2018).

Além dos cimentos apresentados na tabela, existem os cimentos com características especiais, como os resistentes à sulfatos (RS), os de baixo calor de hidratação (BC), os cimentos brancos (CPB) e os cimentos para poços petrolíferos (CPP) (ABCP, 2002).

A cal hidratada (Ca(OH)_2) é outro aglomerante utilizado na produção de argamassas, podendo ser utilizadas de forma mista com o cimento. Em argamassas mistas, a finura da cal proporciona uma maior retenção de água em volta de suas partículas, o que pode contribuir para uma melhor hidratação do cimento (ABCP, 2002). A norma brasileira que estabelece os critérios referentes à cales hidratadas é a NBR 7175 (2003). A quantidade de CO_2 e de óxidos não hidratados no produto são os parâmetros para classificação das cales em CHI, CHII e CHIII, conforme apresentado na tabela 04.

Tabela 4: Exigências químicas e físicas para classificação das cales.

EXIGENCIAS QUIMICAS		CHI	CHII	CHIII
% CO₂ (no depósito)		≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
% óxidos não hidratados (CaO e MgO)		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO + MgO)		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%
EXIGENCIAS FISICAS				
Finura (% retido)	Peneira 600mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 75mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água		≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
Incorporação de areia		≥ 3,0%	≥ 2,5%	≥ 2,2%
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110%	≥ 110%	≥ 110%

Fonte: Adaptado de NBR 7175 (2003).

O endurecimento da cal ocorre na transformação da cal em carbonato de cálcio (CaCO_3) através do processo de carbonatação (reação com o gás carbônico existente na atmosfera).

2.3.3 Agregados

Agregados são materiais, de origem natural ou artificial, de granulometria variável que são incorporados em concreto ou argamassas com o objetivo de proporcionar mais volume às misturas. Esse aumento de volume tem como princípio diminuir o valor final na produção de concretos ou argamassas. Durante muitos anos os agregados foram tratados como material necessariamente inertes, ou seja, que não interferiam nas características finais nem na obtenção das misturas. Conforme descrito produção por Mehta e Monteiro (2008) após uma melhor compreensão sobre o papel desempenhado pelos agregados em determinadas propriedades do concreto, a visão tradicional de material inerte foi sendo questionada.

Na Figura 5 são apresentadas as relações de desempenho do concreto e das argamassas com relação as características físicas dos agregados. Para os agregados de origem natural, suas propriedades físicas, tais como granulometria, absorção de

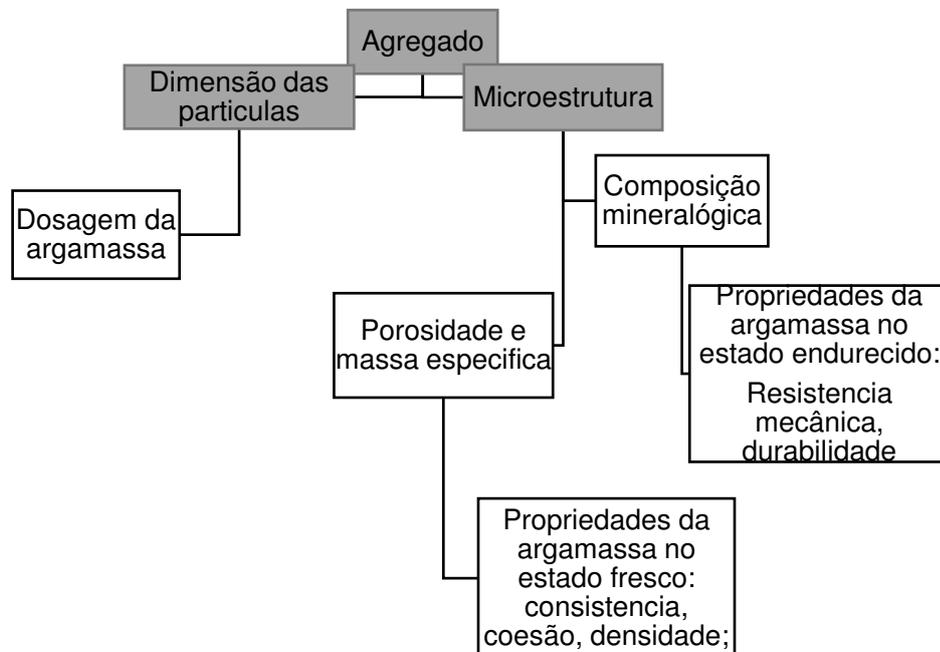


Figura 5: Diagrama ilustrativo de como a estrutura e o processo de fabricação de um agregado pode influenciar nas propriedades das argamassas (adaptado de Mehta e Monteiro, 2008).

água, superfície e porosidade e a composição química são resultados da mineralogia das rochas as quais foram obtidos. Não diferente disto, os agregados de origem artificial, oriundos de resíduos industriais também detém características físicas e químicas que podem influenciar diretamente no desempenho das argamassas e concretos produzidos com estes materiais.

Sendo assim, os agregados foram despertando a cada dia, maiores interesses por parte de pesquisadores interessados em investigar a influência dos agregados na durabilidade e no desempenho de concretos e argamassas.

2.3.3.1 Classificação

A NBR 7211 (2009) apresenta a classificação dos agregados de acordo com sua granulometria em agregados graúdos (material retido na peneira de malha 4,75 mm) ou miúdos (material passante na peneira 4,75mm e que ficam retidos na peneira de malha 150 μm) (Figura 6). Segundo os autores Mehta e Monteiro (2008), com relação a densidade, os agregados podem ser classificados como leves ($\leq 1120 \text{ kg/m}^3$) ou pesados ($\geq 2080 \text{ kg/m}^3$) e médios quando o intervalo entre os dois tipos (Figura 7). Outra forma de classificar os agregados é de acordo com sua origem. Conforme dito anteriormente, os agregados podem ser naturais (Figura 8), obtidos de rochas, ou artificiais, subprodutos industriais (escória de alto forno, cinza volante, concreto reciclado, etc.).



Figura 6: Diferentes tamanhos de brita (blog.construir.arq.br)



Figura 7: Exemplos de agregado leve; argila expandida (argex.pt).



Figura 8: Exemplos de agregados naturais: areia fina (a esquerda) e areia média (a direita) (Modro et al, 2009).

2.3.3.2 Minerais presentes nos agregados

O quartzo, o feldspato, a tridimita e a cristobalita são alguns dos minerais compostos por sílica (SiO) que podem estar presentes em amostras de agregados de origem rochosa. De acordo com Dana (1978), a poderosa ligação que une os íons de oxigênio e silício é, literalmente, o “cimento” que mantém unida a crosta da Terra. Dada esta afirmação do autor, é possível compreender a dureza dos materiais silicatos diante da estrutura de ligação dos átomos constituintes das moléculas dos silicatos.

Outros minerais encontrados nos agregados é a calcita e a dolomita, minerais carbonáticos que possuem em sua estrutura molecular a presença de carbonato de cálcio (CaCO₃) e/ou carbonato de magnésio (MgCO₃) e possuem dureza inferior à dos silicatos (Mehta e Monteiro, 2008). Ainda segundo os autores, os sulfetos de ferro

(pirita, marcassita e pirrotita) são minerais encontrados também em agregados naturais, porém, tanto estes minerais ferrosos, quanto a gipsita podem proporcionar malefícios aos compostos de concreto e às argamassas. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os minerais ferrosos podem oxidar-se rapidamente, formando ácido sulfúrico e hidróxido de ferro que podem promover a corrosão do aço de estruturas de concreto. Já os minerais cálcicos como a gipsita e anidrita são considerados impurezas em rochas, e por vezes podem recobrir a areia, viabilizando assim, um possível o ataque interno ao concreto por sulfato.

2.4 Durabilidade em argamassas e concretos

O conceito de durabilidade dos materiais de construção tem sido amplamente abordado em pesquisas sobre argamassas e concretos, uma vez que a preocupação com a qualidade dos produtos tem despertado cada vez mais interesse nos usuários. A preocupação frequente com manutenção e, conseqüentemente, com a redução e custos operacionais, tem levado aos construtores a se preocuparem com a vida útil dos sistemas construtivos. Associado ao despertar dessa preocupação está a Norma de Desempenho NBR 15575-1 (2013) que traz preocupações com o desempenho, a vida útil, a eficiência e a sustentabilidade das edificações de uso residencial.

O conceito de durabilidade está diretamente associado ao conceito de vida útil das edificações. Durabilidade é a capacidade de uma estrutura ou de seus componentes em satisfazer os requisitos de desempenho estabelecidos pelo projeto por um período específico; vida útil é período efetivo de tempo durante o qual uma estrutura satisfaça os requisitos de desempenho do projeto sem ações imprevistas de manutenção ou reparo (NBR - ISO, 2015).

Segundo Possan e Demoliner (2016) diversos debates foram promovidos na última década no Brasil para tratar sobre as responsabilidades das obras. Institutos e Associações como o IBRACON (Instituto Brasileiro de Concreto), a ABECE (Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural), a ABMS (Associação Brasileira de Mecânica dos Solos) fomentaram debates técnicos sobre o tema. No âmbito internacional, organizações como o ACI (*American Concrete Institute*), a FIB (*Fédération Internationale Du Béton*), a RILEM (*International Union o Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*), a ISO (*International*

Standards Organization), há anos têm trabalhado para melhorias no setor da construção civil, inserindo novos conceitos visando a durabilidade e aumento da vida útil das construções.

De acordo com Possan (2010), diante das constantes mudanças nas tecnologias e nos materiais utilizados na construção civil, percebeu-se que avaliar as exigências dos projetos para as argamassas e os concretos utilizando apenas o parâmetro de resistência (R) seria insuficiente. Assim, enfatizou-se que a durabilidade (D) e o desempenho (DES) dos materiais construtivos também deveriam ser analisados (Figura 9).

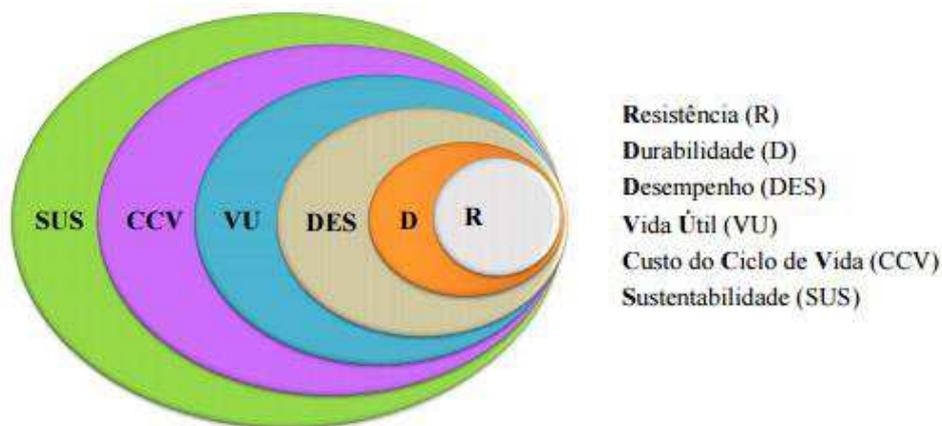


Figura 9 – Evolução conceitual da visão dos parâmetros de análise dos projetos de concreto (Possan, 2010).

Grande parte das patologias encontradas em argamassas de revestimento (fissuras, destacamentos, manchas, lixiviação, etc.) está ligada diretamente a quantidade de poros existentes. A presença e a dimensão desses poros estão ligadas diretamente a fatores como relação água/cimento, relação cimento/areia, distribuição granulométrica dos materiais, empacotamento de partículas, grau de carbonatação, bem como no processo de preparação e cura da argamassa.

Carasek (2010) apresenta as principais impurezas nos agregados e suas consequências nas argamassas de revestimento, conforme resumido na Tabela 05.

Tabela 5: Impurezas dos agregados e as consequências nas argamassas de revestimento.

Impurezas	Manifestações patológicas	Mecanismo	Fontes prováveis
-----------	---------------------------	-----------	------------------

Torrão de argilas	- Desagregação do revestimento;	Os torrões absorvem muita água e desagregam, originando vazios.	Agregados de minas.
Matéria orgânica	- Inibe a pega e a endurecimento da argamassa; - Desagregação do revestimento	Desagregação pela baixa aderência entre os grãos ocasionada pela presença dos ácidos de materiais orgânicos que podem neutralizar a água das argamassas.	Coleta inadequada do material.
Gipsita e Anidrita	- Fissuração; - Desagregação do revestimento;	Liberam SO ₄ que reagem com compósitos do cimento formando produtos expansivos (etringita e gipsita).	Ocorrem geralmente em rochas sedimentares e carbonatos.
Sulfeto de Ferro (Pirita)	- Manchas escorridas de cor ferrugem; - Desagregação do revestimento;	Formação de compostos expansivos resultantes da dissociação e oxidação de Fe e S, formando sulfatos que reagem com o produto do cimento formando produtos expansivos (etringita e gipsita).	Rochas vulcânicas, metamórficas e sedimentares.
Sais solúveis	- Eflorescências; - Acelera a pega e o endurecimento da argamassa (cloretos); - Desagregação (sulfatos);	Os sais são dissolvidos pela água e levados à superfície do revestimento formando material pulverulento, geralmente branco.	Agregados de origem litorânea.
Mica (muscovita, biotita, sericita)	- Desagregação; Esfoliação; - Deslocamento do revestimento; - Aumento da demanda de água de revestimento;	A forma cristalina da Mica (placas) durante a aplicação da argamassa pode proporcionar uma redução da aderência da argamassa ao substrato.	Rochas ígneas e metamórfica.

Fonte: Adaptado de Carasek (2010).

2.4.1 Reação de álcalis

A reação de álcalis, ou reação álcali-agregado (RAA) como é mais conhecida, é o nome dado ao fenômeno de formação de um gel expansivo que ocorre em concretos e argamassas. Esse gel expansivo é o produto de uma reação entre os álcalis presentes no cimento Portland e determinados minerais presentes na composição química dos agregados.

A norma NBR 15577 subdivide a RAA de acordo com o reagente que provoca a reação, podendo ser uma reação álcali-sílica, álcali-silicato ou álcali-carbonato. Segundo Ticher (2010 apud Gomes Neto e Barreto, 2013) os silicatos amorfos desencadeiam a reação álcali-sílica e os silicatos melhor cristalizados desencadeiam a reação álcali-silicato. Com relação a reação álcali-carbonato (RAC) é diferenciada pois não ocorre a formação do gel. De acordo com o autor, nesta reação ocorre a desdolomitização da rocha e, conseqüentemente o enfraquecimento da ligação pasta-agregado.

A fonte de álcalis do cimento que provocam as reações é proveniente das matérias-primas constituintes do próprio cimento. Segundo Mehta e Monteiro (2008), dependendo do teor de álcali do cimento, o pH da solução dos poros em concretos geralmente é entre 12,5 e 13,5, o que representa uma solução extremamente alcalina. Havendo a presença de sílica amorfa no agregado, a instabilidade deste material favorece a reação química com os hidróxidos de sódio e potássio da solução, gerando o gel expansivo.

Em relação aos minerais presentes a composição dos agregados, a NBR 15577-3 (2018) apresenta uma relação entre as rochas e os minerais suscetíveis ao desenvolvimento da reação com álcalis do cimento (Tabela 06).

Tabela 6: Tipos de rochas e os minerais potencialmente reativos.

Tipos de Rochas	Minerais reativos
Rochas Sedimentares: opala, arenito, cherts, flints e diatomito;	Opala, tridimita ou cristobalita, vidro vulcânico ácido, intermediário ou básico
Rochas Vulcânicas com vidro ou vitrofíricas	
Rochas Sedimentares: arenito, siltito, argilito, calcario silicoso, etc.	Calcedônia, quartzo micro e criptocristalino.
Rochas Metamórficas: gnaisse, quartzo-mica, quartzito, ardósia, etc.	Quartzo macroangular, com reticulo cristalino deformado;

Rochas Ígneas: granito, granidionito, etc.
Rochas Vulcânicas com vidro devitrificado micro ou criptocristalino

Fonte: NBR 15577-3 (2018).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a RAA consiste em reações químicas que ocorrem entre agregados reativos (minerais silicosos reativos) e os hidróxidos alcalinos dissolvidos na solução dos poros do concreto. Segundo Pereira et al (2018), como resultado da reação álcali-agregado forma-se um gel higroscópico expansivo, podendo gerar expansão, fissuração, exsudação de gel no concreto, com redução de resistência e módulo de deformação, além de movimentações diferenciais nas estruturas. A Figura 10 apresenta os fatores necessários para ocorrência de reação álcali-agregado.



Figura 10: Fatores necessários para que ocorra a reação álcali-agregado. Ocorrência da reação na fundação de um pilar (imagem cedida pelo autor Tibério Andrade).

2.5 Estado da Arte

Neste item são apresentadas pesquisas recentes relacionadas ao tema da tese. A base de dados de periódicos utilizada foi a *Science Direct* e as pesquisas foram direcionadas àquelas que utilizaram resíduos industriais na produção de argamassas, sobre a durabilidade das argamassas e seus agentes de deterioração e por fim, pesquisas que apresentaram resultados com base na análise microestrutural das argamassas produzidas. Um primeiro levantamento quantitativo foi realizado com o objetivo de identificar as principais revistas que abordavam o tema e a quantidade de artigos publicados ao longo dos últimos dez anos. Assim, foram realizados três filtros de acordo com algumas palavras chaves utilizadas nesta pesquisa. Os resultados encontrados com os filtros em revistas específicas demonstram um aumento no interesse da comunidade acadêmica em pesquisar sobre durabilidade e aplicação de resíduos na produção de argamassas. Ao mesmo tempo que é possível identificar na Figura 12, uma grande deficiência com relação às pesquisas sobre a utilização do resíduo da extração de tungstênio.

No levantamento quantitativo foram levadas em consideração as publicações das seguintes revistas: *Construction and Building Materials*, *Cement and Concrete Research*, *Cement and Concrete Composites*, *Materials and Design*, *Waste Management*, *Building and Environment*, *Ceramics International*. Este primeiro levantamento gerou um quantitativo bem extenso de publicações (3188 artigos), assim o levantamento do estado da arte do tema desta tese foi realizado com base nas publicações dos últimos 6 anos (2010-2016) e considerando apenas as publicações que abordaram o tema durabilidade de argamassas com resíduos no título, resumo ou palavras chaves dos artigos. Considerando essa nova filtragem e os artigos que continham resíduo de extração de tungstênio em sua temática, fez o universo da pesquisa para 131 artigos. As referências com maiores relevâncias de resultados e melhores condições de aplicabilidade são apresentadas nos próximos itens, e serviram de base para montagem da metodologia da parte experimental desta pesquisa.

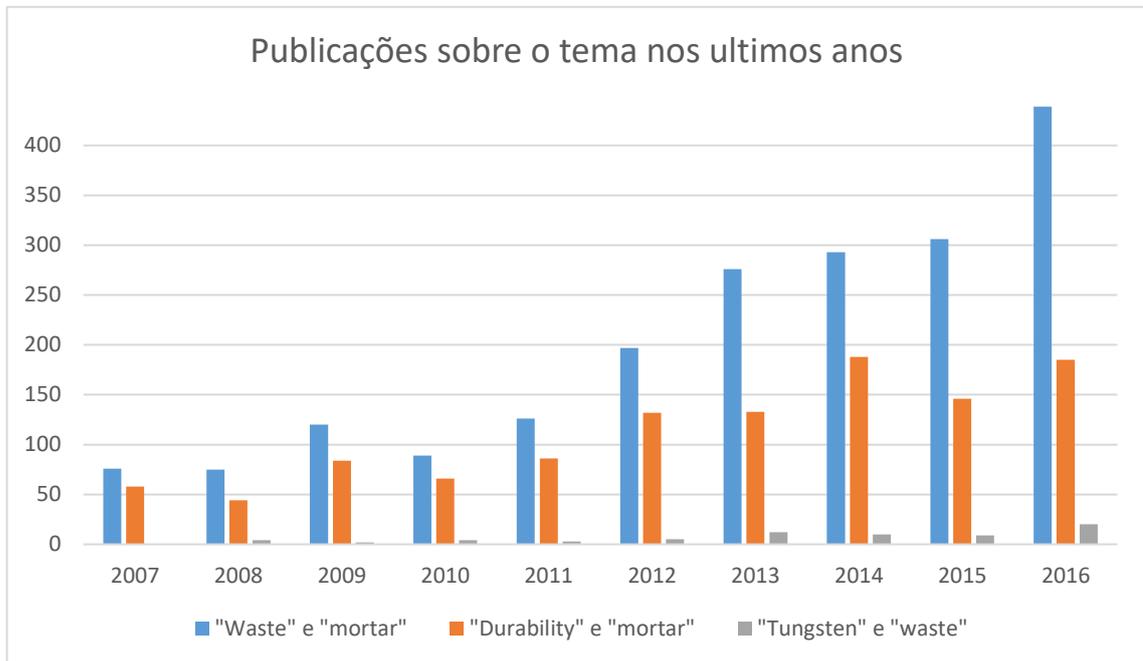


Figura 11: Quantitativo de publicações existentes na base de dados da Science Direct acerca dos temas abordados.

2.5.1 Resíduos Industriais Utilizados na Construção Civil

Segundo o IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração, a produção mineral brasileira em 2014 foi de cerca de 43 bilhões de dólares, com estimativa de investimentos na ordem dos 53,6 bilhões de dólares anuais para o período de 2014 a 2018, o que caracteriza um avanço no crescimento do setor. O Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior também registrou um crescimento do setor nas últimas décadas, porém destacou que ao longo dos anos a atividade mineral tenha sofrido uma redução devido às mudanças socioeconômicas que ocorreram no país. O aproveitamento dos resíduos produzidos neste setor para sua utilização na construção civil também tem se intensificado ao longo dos anos. Segundo Manhaes e Holanda (2008), o setor de beneficiamento de rochas ornamentais deparou-se com as questões ambientais, o que impulsionou a busca de alternativas viáveis para a deposição destes resíduos produzidos. Ainda segundo os autores, o fato de a construção civil ser um dos maiores exploradores de recursos naturais, o setor pode tornar-se um potencial agente de absorção dos resíduos industriais e urbanos.

Diversas pesquisas foram encontradas sobre a utilização de resíduos da mineração aplicados na construção civil. Moura, Leite e Barros (2013), realizaram pesquisa com incorporação do resíduo proveniente da serragem da pedra cariri para a produção de concreto convencional e constataram que favorece aos critérios de durabilidade (o protótipo incorporado com resíduo alcançou os resultados do concreto de referência). Com relação a utilização do resíduo da mineração da Scheelita, Silva et al (2018) estudaram a incorporação deste material à matriz cerâmica. Segundo os autores, a formulação que apresentou as melhores propriedades foi com 10% de resíduo mineral, apresentando desempenho satisfatório para fabricação de tijolos cerâmicos. Assis et al (2016) produziram placas de solo-cimento com a adição de resíduos de Scheelita e concluíram que é viável a utilização desse resíduo como matéria-prima. Pesquisa semelhante a proposta foi encontrada em Paiva (2013), onde o autor avaliou a utilização do resíduo de Scheelita na produção de concreto, porém o principal objetivo do autor foi analisar o percentual de substituição mais eficiente, chegando ao valor de 60%. Galvão et al (2016) caracterizaram compósitos de espuma de poliuretano de mamona com rejeito de Scheelita e do porcelanato e concluiu que a aplicação destes materiais pode reduzir o custo com matéria-prima e os danos ambientais.

2.5.2 Durabilidade

Cheah e Ramli (2012) pesquisaram a utilização de cinzas de madeira com altos teores de cálcio como substitutivo parcial do cimento em argamassas. Percentuais de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de substituição do cimento pelo material produziram seis diferentes misturas. Além dos ensaios de resistência mecânica (compressão e flexão), os autores realizaram ensaios direcionados a durabilidade da argamassa. Testes de retração, absorção de água e grau de carbonatação também foram realizados com o objetivo de avaliar o comportamento da argamassa.

Para a avaliação da absorção de água os autores moldaram corpos de prova cilíndricos com 75 mm de diâmetro e 100 mm de altura, já para a verificação do grau de carbonatação foram moldados corpos de prova prismáticos (40 mm x 40 mm x 160 mm). Para a verificação do grau de carbonatação, as amostras foram imersas em uma solução saturada de cálcio após o desmolde e curados durante 28 dias. Após este

período inicial de cura, os corpos de prova foram secos e submetidos a uma cura com 50% de umidade e 23°C de temperatura durante 91 dias. Aos 91 dias de idade, as amostras foram borrifadas com fenolftaleína para identificar as zonas de carbonatação. Com relação ao ensaio de absorção, todas as amostras apresentaram índices de absorção maiores que às argamassas com 0% de substituição, com maiores valores encontrados para os percentuais de 5% e 10%.

Tobon, Payá e Restrepo (2015) analisaram os efeitos da substituição do cimento por nanopartículas de sílica na durabilidade de argamassas produzidas com cimento Portland. Corpos de prova com substituição de 0%, 1%, 3%, 5% e 10% foram submetidos ao ensaio e resistência a sulfato (ataque por imersão) durante 154 semanas e foi verificado que conforme o percentual de substituição aumenta, menor é a expansão dos corpos de prova. A verificação da porosidade das amostras produzidas é de extrema aplicabilidade, pois, conforme afirmam os autores, a quantidade de água livre exigida pelo silicato de cálcio hidratado (CSH) é maior que a quantidade necessária para portlandita (CH), assim quanto menos água livre existir, menor será a quantidade de poros formados nas amostras. A teoria foi confirmada com os resultados da porosimetria, onde as amostras com maiores percentuais de nanosilica apresentaram menores percentuais de porosidade.

Outra pesquisa que trabalhou com a substituição do cimento por partículas de nanosilica foi a de Zahedi, Ramezaniapour e Ramezaniapour (2015), onde os autores analisaram a influência da nanosilica e da cinza da casca do arroz no desempenho e na durabilidade de argamassas. Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados em corpos de prova prismáticos (50x50x50mm) nas idades de 7 e 28 dias. As amostras que obtiveram menores resultados de absorção de água foram as que combinaram a nanosilica com a cinza da casca de arroz em sua composição e para as idades mais avançadas, o que comprova que a ação da nanosilica é mais eficaz a longo prazo.

Barros et al (2016) utilizaram o resíduo do corte de quartizito na substituição total ao agregado natural em argamassa de revestimento e investigaram a reatividade desse resíduo com os álcalis do cimento. Devido a forte presença de portlandita (Ca(OH)_2) e calcita (CaCO_3) na composição do resíduo, os autores optaram por realizar a verificação da reatividade dos álcalis do cimento com os minerais amorfos presentes nos agregados. Foram moldados corpos de prova prismáticos (25 mm x 25 mm x 285 mm) e submetidos ao processo de aceleração de expansão de barras por imersão em

solução de hidróxido de sódio (NaOH). Após 28 dias, as barras foram medidas e os autores concluíram que as expansões que ocorreram estavam dentro do limite permitido pela norma, bem como nas imagens de microscopia eletrônica de varredura não identificaram nenhum processo de formação de gel expansivo.

Neramitkornburi et al (2015) afirmam que submeter os materiais de construção à ciclos de molhagem e secagem é um importante parâmetro pra investigar a durabilidade deste material, porém os próprios autores afirmam que ainda existem pouca referência sobre este tipo de ensaio. Ainda segundo os autores, a redução na resistência à compressão é atribuída a degradação do cimento, que pode ser verificada através da exposição do material a ciclos de molhagem e secagem. Os autores submeteram corpos de prova cilíndricos (50 x 100 mm) à imersão em água deionizada por 5 horas e então secos em estufa (70°C) por 48 horas e depois secos ao ar por pelo menos 3 horas. Os três processos resultavam em um ciclo, e os resultados foram avaliados após 1, 3 e 6 ciclos.

Djobo et al (2016) também apresentaram avaliações da durabilidade de materiais submetidos a ciclos de molhagem e secagem, onde os autores submeteram corpos de prova cúbicos (50 mm x 50 mm x 50 mm) de geopolímeros com cinza vulcânica após 28 dias de cura inicial, a uma permanência 24 horas em estufa (65°C) e 24 horas em imersão em água, o que contabilizava um ciclo. Os resultados apresentados foram referentes a exposição de 0, 5, 10, 15, 20 e 25 ciclos e o material produzido não apresentou degradação relevante após os 25° ciclo.

2.5.3 Análise microestrutural

Evangelista et al (2015) pesquisaram sobre a utilização de resíduo de concreto na produção de agregados, comparando-o com dois tipos de agregados naturais. Ensaio de densidade e absorção de água foram realizados, a avaliação mineralógica e microestrutural dos agregados produzidos foi o que objetivou a citação deste artigo. Através do difratograma dos agregados reciclados de concreto em diferentes granulometrias foi possível identificar as diferentes fases mineralógicas de acordo com o tamanho das partículas. Calcita, quartzo, feldspato de potássio e de sódio foram identificados em todas as frações e em frações específicas (125 µm e 1 mm) foram identificados picos de etringita.

A análise da microestrutura dos agregados através de MEV apresentou características semelhantes entre as frações de maior granulometria (entre 1 e 4mm), com superfícies irregulares, mas homogênea (Figura 12).

As imagens das frações de 250 μm e 150 μm (Figura 13), apresentam uma morfologia similar, porém com a presença de diferentes fases cristalinas dos produtos de hidratação do cimento, CH para as fases iniciais (partículas mais arredondadas) e CSH, fases mais avançadas, partículas do tipo “agulhas”.

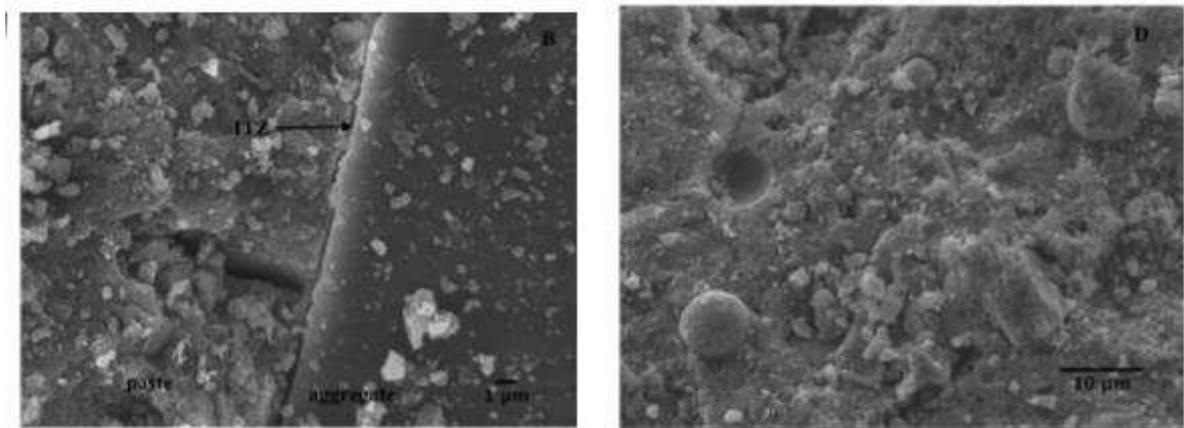


Figura 13: Agregados produzidos com 1 e 4 mm (Evangelista et al, 2015).

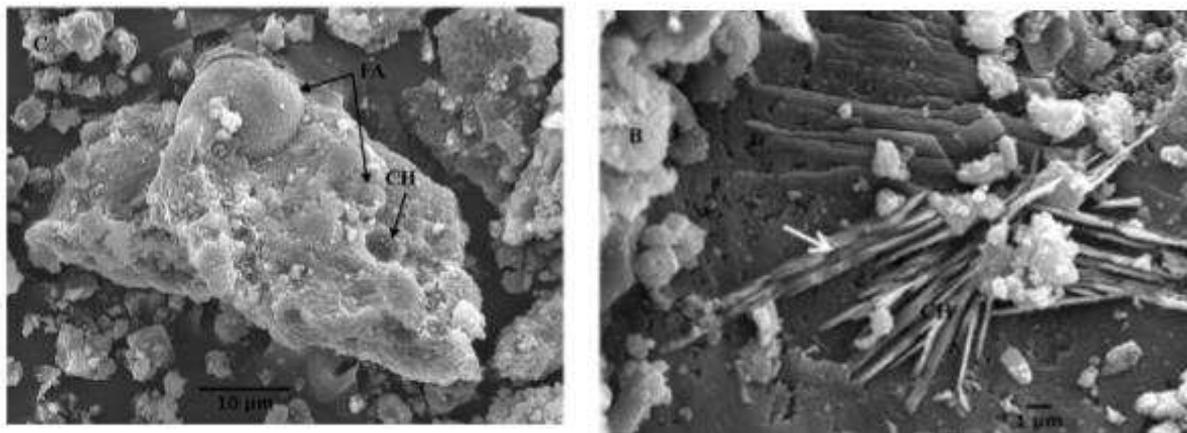


Figura 12: Agregados produzidos com 150 μm e 250 μm e as diferentes fases cristalinas presentes, tais como CH (esquerda) e CSH (direita) (Evangelista, 2015).

Schackow et al (2015) utilizaram micrografias para avaliar o comportamento de argamassas produzidas com a utilização de resíduos de blocos cerâmicos em substituição parcial do cimento. Os autores avaliaram o comportamento de argamassas produzidas através dos ensaios de absorção aparente e por capilaridade, resistência a sulfatos e cloretos, carbonatação natural. A imagem obtida através da microscopia eletrônica de varredura permitiu a identificação da morfologia dos poros da argamassa,

com a presença dos cristais de portlandita localizados próximos aos poros (Figura 14). Os autores afirmam que esses cristais de portlandita próximos aos poros indicam que uma reação tardia do CH pode influenciar na dimensão dos poros e, conseqüentemente, no desempenho da argamassa.

Na pesquisa de Aksogan et al (2016) são produzidos concretos com substituição parcial dos agregados finos por frações de colemanita e barita, e a substituição parcial do cimento por cinzas do bagaço do milho, palha de trigo e do talo do girassol. Além da investigação da durabilidade através dos ensaios de resistência a sulfatos, congelamento e descongelamento e abrasão da superfície, a investigação através de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura auxiliaram na investigação do comportamento do concreto.

Segundo os autores, a microscopia evidenciou que a substituição parcial do agregado e do cimento reduziu a formação de vazios, conseqüentemente aumentando a resistência mecânica. A Figura 15 apresenta o concreto com substituição e o concreto de referência.

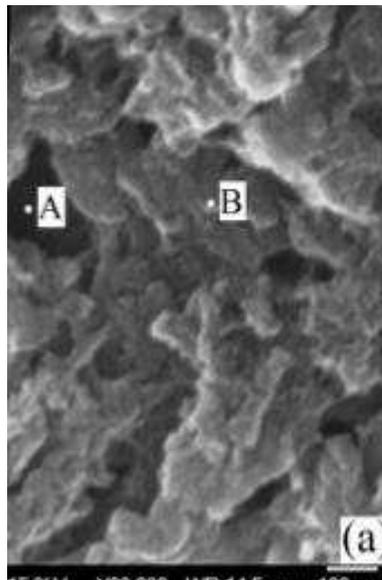


Figura 14: Micrografia da amostra aos 90 dias com identificação dos pontos A (poro) e B (Portlandita) (Schackow et al, 2015).

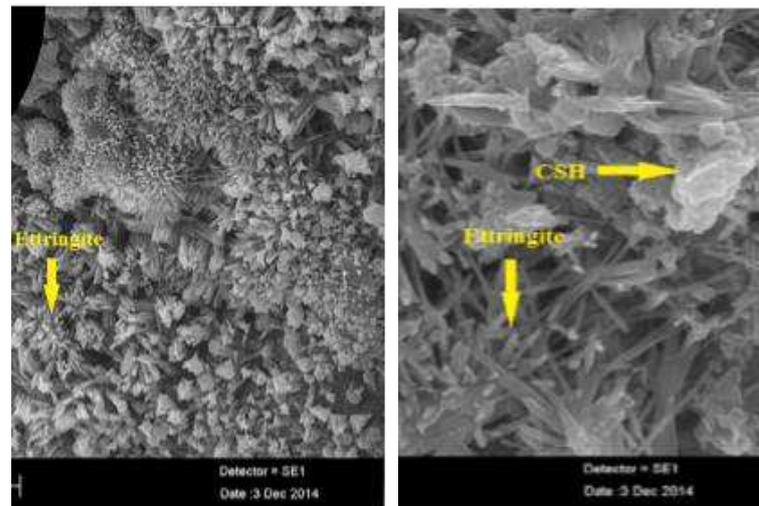


Figura 15: Micrografia aos 180 dias do concreto com substituição (esquerda) e do concreto de referência (direita (Aksogan, Bicini e Ortlek, 2016)).

Trafaoui et al (2016) estudaram o comportamento mecânico da incorporação do metacaulim na composição de concretos de alta resistência. Nesta última publicação, os autores apresentam os resultados referente a avaliação da durabilidade destes compósitos. Após os ensaios de durabilidade, com o objetivo de confirmar os resultados obtidos, foram geradas imagens de microscopia eletrônica. A micrografia apresenta nitidamente as diferentes fases do compósito tais como: os grãos de quartzo, grãos de areia, pasta de cimento e os grãos da fase inicial da hidratação do cimento (Figura 16). Esta última fase bastante presente o que, segundo os autores, confere a propriedade de alta resistência tardia do concreto (após os 28 dias de cura inicial).

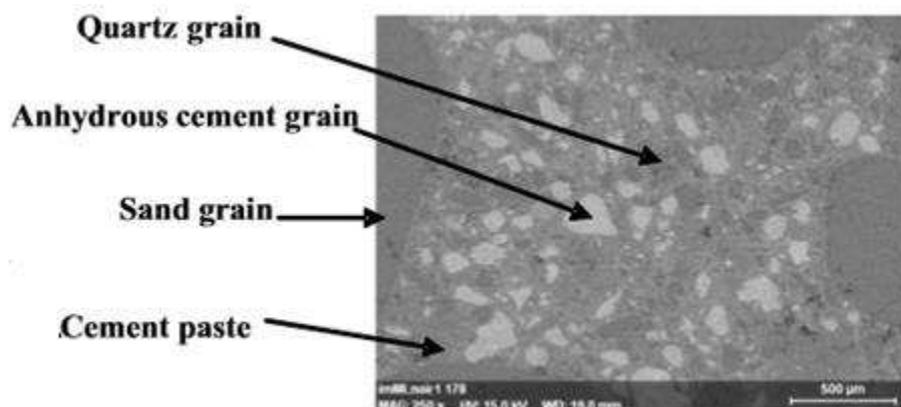


Figura 16: Micrografia aumentada 250x do concreto com adição de metacaulim (Trafaoui, Escadeillas, & Vidal, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Resíduo de Scheelita

Os resíduos da Scheelita foram coletados nas dunas existentes no complexo da indústria mineradora Mineração Tomaz Salustiano S/A, localizada no município de Currais Novos no Rio Grande do Norte. Os resíduos da Scheelita são diferenciados na mineradora em grosso e fino.

Na produção das argamassas, utilizou-se o resíduo de Scheelita em seu estado grosso (de acordo com a classificação da mineradora), caracterizado como agregado miúdo em substituição total do agregado natural.

3.1.2 Cimento

Cimento - O cimento utilizado na pesquisa foi o cimento Portland do tipo CP V, que não apresenta adição e tem mais reatividade que os demais nas idades iniciais.

3.1.3 Cal

Cal - A cal (hidróxido de cálcio) utilizada como aglomerante para a produção da argamassa foi utilizada na forma industrializada de classe CH-I, considerada pela norma NBR 7175 (2003) de maior grau de pureza e qualidade.

3.1.4 Areia

A areia utilizada para a confecção dos corpos de prova de referência (sem substituição) foi a areia normal brasileira. A produção e fornecimento deste material são de atribuição do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. A areia normal detém

frações granulométricas específicas, bem como requisitos físicos e químicos, ambas informações estabelecidas na NBR 7214 (2015).

3.2 Métodos

As etapas para realização da pesquisa foram descritas nos fluxogramas das Figuras 17 e 18.

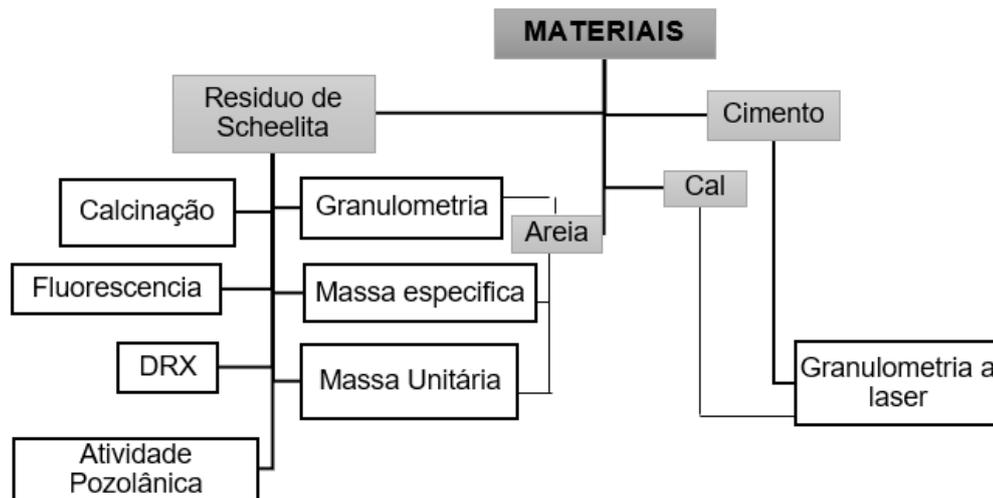


Figura 17: Fluxograma para caracterização dos materiais utilizados.

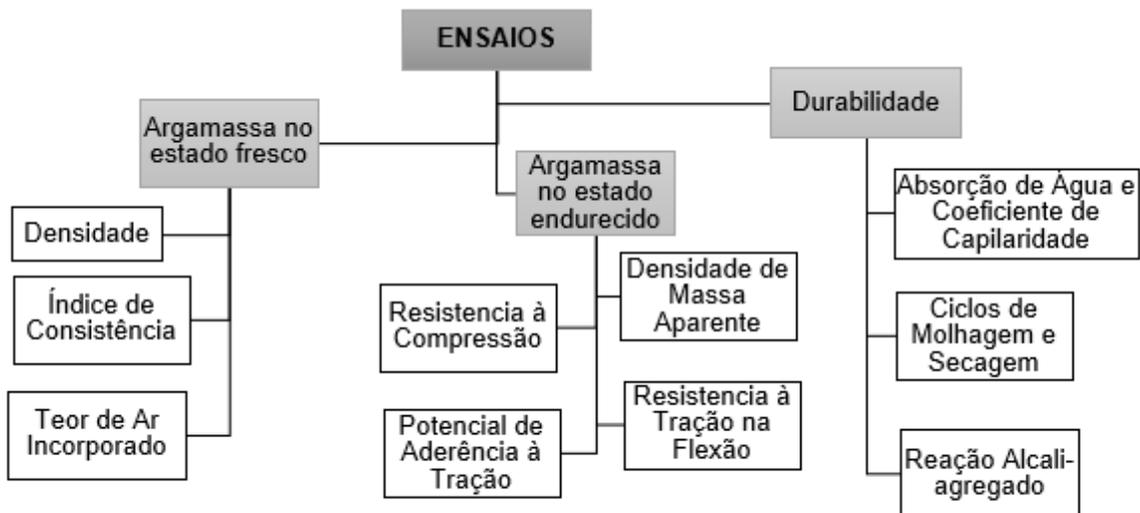


Figura 18: Fluxograma dos experimentos realizados na argamassa produzida.

3.2.1 Caracterização Física dos Materiais

A caracterização física do resíduo foi fundamental para a produção dos traços de argamassa e concreto. Através desta análise foi possível dosar corretamente cada material (agregados, aglomerantes, água e aditivos). Para iniciar a caracterização, o resíduo passou pelo processo de amostragem, que pode ser definido como a retirada de uma fração de um determinado lote de material com o objetivo de reduzir a amostra analisada em laboratório.

Considerando que em sua grande maioria, as amostras de agregados detêm características heterogêneas, o processo de amostragem tem como objetivo reduzir a amostra coletada (NBR NM 26, 2009) para uma quantidade mais homogênea possível.

Segundo a NM 27 (2001), as amostras devem ser identificadas conforme a conveniência de cada pesquisador, mas deverão conter informações tais como: designação do material, número de identificação de origem, tipo de procedência, massa, local e data da amostragem e responsável pela coleta.

As amostras de agregado foram levemente umedecidas para evitar a perda do material pulverulento e assim reduzidas utilizando o método do quarteamento. O método do quarteamento é descrito também na NBR NM 27 (2001). A amostra é dividida em quatro partes, duas no sentido diagonal serão descartadas e as outras duas partes agrupadas novamente. Este procedimento é repetido até reduzir a amostra à quantidade necessária para a execução do ensaio pretendido (Figura 19).



Figura 19: Processo de quarteamento da amostra.

3.2.1.1 Granulometria

As peneiras usadas na análise granulométrica dos materiais foram as padronizadas e especificadas pela norma da NBR NM ISO 3310 (2010) e a distribuição granulométrica foi obtida conforme as orientações da NBR 248 (2003).

Ao final do ensaio, são apresentadas as porcentagens retidas em cada peneira, as porcentagens acumuladas de cada peneira, a dimensão máxima característica e o módulo de finura do agregado.

3.2.1.2 Massa Específica e Massa Unitária

A massa específica dos materiais foi obtida conforme a norma NBR 52 (2009) e a determinação da massa unitária de um agregado, que auxilia na conversão dos traços em massa e volume e vice-versa, foi obtida conforme as especificações da NBR 45 (2006) (Figura 20).



Figura 20: Equipamentos utilizados para ensaio de massa específica (esquerda) e massa unitária (direita).

3.2.2 Classificação Ambiental do Resíduo (ABNT NBR 10004/2004)

A classificação ambiental do resíduo refere-se à quantificação dos elementos presentes nas amostras coletadas com o objetivo de classificar o resíduo como classe IIA – não inerte ou classe IIB -inerte, segundo a NBR 10004 (2004).

A quantificação desses constituintes é realizada através de uma espectrometria por absorção atômica. A espectrometria é uma análise química que consiste na quantificação de elementos de uma amostra. Esta quantificação é obtida através da absorção e emissão de radiação por parte dos elétrons de cada elemento, sendo possível assim identificar e quantificar os metais presentes na amostra.

A obtenção dos extratos solubilizados dos resíduos sólidos seguiu os procedimentos indicados na NBR 10006 (2004), onde foram separadas duas amostras de aproximadamente 250g previamente secas em estufa. Essas amostras foram colocadas em um frasco com 1000ml de água destilada e agitadas por 5 minutos. O frasco foi coberto com papel filme e permaneceu em repouso por 7 dias em temperatura de 25°C. Passados os 7 dias, a solução foi filtrada com membrana de 0,45 µm de porosidade e encaminhada para laboratório específico para análise por espectrometria atômica para parametrização dos elementos constituintes. A obtenção dos extratos lixiviados e solubilizados ocorreu no Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos da Universidade Federal de Campina Grande (LABGER-UFCG). A espectrometria por absorção atômica foi realizada pelo Laboratório de Análises Químicas da Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Científico e Tecnológico e de Agricultura, Pesca e Irrigação do estado de Goiás (FUNMINERAL).

3.2.3 Caracterização Química e Mineralógica dos Materiais e das Misturas

3.2.3.1 Fluorescência de Raio X

A análise química por fluorescência de raio X (FRX) foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB com o equipamento EDX-720 Shimadzu.

3.2.3.2 Difração de Raio X

Para realização dos ensaios, as amostras foram beneficiadas em peneira ABNT N°200(0,074mm). O equipamento utilizado foi o XRD-6000 Shimadzu e para a análise dos dados foram utilizados os softwares Origin 8.0 (para desenvolver os

gráficos) e o X'Pert para a identificação dos picos. Os parâmetros utilizados para análise das amostras foram de 0,02 o passo com ângulo de 2θ percorrido entre 10° e 70° . As análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Materiais da UFCG, Campina Grande – PB

3.2.3.3 Termogravimetria

Nesta pesquisa, a análise térmica teve como principal objetivo identificar o comportamento do resíduo quando submetido à elevadas temperaturas (até 1000°C). Para realização dos ensaios, as amostras foram beneficiadas em peneira ABNT N°200 (0,074 mm), e o equipamento utilizado foi do Modelo RB-3000 da BP Engenharia Indústria e Comércio, com razão de aquecimento $12,5^\circ\text{C}/\text{min}$. A temperatura máxima foi de 1000°C e o padrão utilizado na ATD foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado, em atmosfera de ar. Os dados obtidos foram levados ao software Origin 8.0 para obtenção das curvas. A análise foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais da UFCG, Campina Grande – PB.

3.2.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

Para a avaliação da morfologia do grão do resíduo, e a estrutura da argamassa foi usado o Microscópio Eletrônico de Varredura. Com o equipamento de energia dispersiva (EDS) acoplado ao MEV foi possível verificar o percentual dos elementos químicos existentes assim como proceder a investigação sobre a reação álcalis-agregado.

A preparação das amostras para o MEV foi diferenciada de acordo com o tipo de investigação que foi feita. As amostras analisadas por elétrons retroespehados (BSE), com o objetivo de investigar composição química, passaram pelo processo de corte, com o auxílio do equipamento Accutom-50 com disco de diamante, na velocidade 700 rpm e sem o auxílio de água e em seguida pelo processo de embutimento em resina (Figura 21). Para o polimento, foi utilizado o equipamento RotoPol-22 com força de 15 N para cada amostra, sem o auxílio de água e com lixas de números 200 e 1400.

Areia, concreto e argamassas não são materiais condutíveis, assim, as amostras passaram por uma etapa de recobrimento. As amostras polidas foram recobertas com carbono. A Figura 22 apresenta as amostras que foram analisadas por elétrons secundários (SE) foram submetidas apenas ao processo de recobrimento com ouro.



Figura 21: Amostras da argamassa produzida após o processo de embutimento.

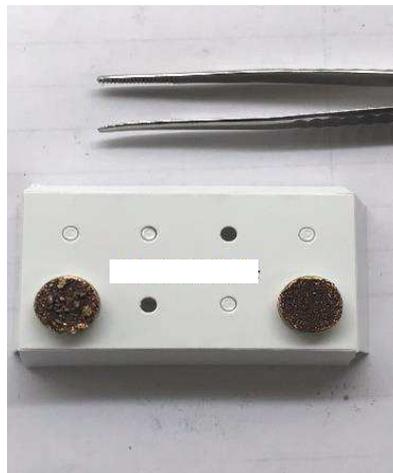


Figura 22: Amostras do resíduo de Scheelita e da areia norma após o processo de recobrimento por ouro.

3.2.4 Atividade Pozolânica

Para verificação da atividade pozolânica, o resíduo de Scheelita foi beneficiado em um moinho de bolas por um período de 4 horas (Figura 23). Após a moagem, parte do material foi submetido a um processo de calcinação, que consiste numa reação

química de decomposição térmica através da queima do material em altas temperaturas para transformar o calcário (CaCO_3) em óxido de cálcio (CaO), conforme equação 01 abaixo. A calcinação foi realizada no forno a uma temperatura de 900°C durante 2 horas.



Figura 23: Resíduo de Scheelita após o processo de moagem.

Segundo (Mehta & Monteiro, 2008), um dos principais constituintes primários do cimento Portland são as fontes de silicato de cálcio. A forte presença do carbonato de cálcio (CaCO_3) nas amostras do resíduo de Scheelita estimularam a investigação sobre a atividade pozolânica do material. A descoberta de atividade pozolânica em um determinado resíduo pode direcionar sua utilização na fabricação de cimentos, onde são aproveitados para garantir as propriedades ligantes do material.

A norma da NBR 12653 (2015) estabelece as condições físicas e químicas para o material ser considerado pozolânico. Uma das principais exigências é o índice de atividade pozolânica, que pode ser obtido com cal ou com o cimento

Seguindo a norma, foram produzidos corpos de prova cilíndricos (5 cm x 10 cm) com três tipos de argamassa, a tipo A contendo apenas o cimento Portland e a tipo B com substituição de 35% do volume do cimento pelo resíduo (após moagem) e a tipo C, com o mesmo percentual de substituição, porém após moagem e calcinação. Após a moldagem, os corpos de prova são curados em um recipiente com água saturada de hidróxido de cálcio durante 28 dias, até serem submetidos aos ensaios de compressão. O índice de atividade pozolânica foi definido através da equação abaixo:

$$\frac{f_{cB}}{f_{cA}} * 100 (\%) \quad (2)$$

Onde,

f_{cB} é a resistência média aos 28 dias dos corpos-de-prova moldados com cimento e o resíduo (argamassas B e C);

f_{cA} é a resistência média aos 28 dias dos corpos-de-prova moldados só com cimento (argamassa A);

A água requerida também deve ser apresentada entre os critérios de verificação de atividade Pozolânica do resíduo, e foi calculada por:

$$\frac{B}{A} * 100 (\%) \quad (3)$$

Onde B é a quantidade de água para obtenção dos índices de consistência normais (225 mm) para as argamassas B e C, e A é a quantidade de água para obtenção dos mesmos índices para a argamassa A.

3.2.5 Preparo das Misturas

Após os procedimentos de caracterização das amostras dos resíduos foi possível começar a se definir os traços que serão utilizados para a moldagem dos corpos de prova para argamassa. Para os experimentos de referência foram utilizados o traço apenas com o cimento, cal e areia normal (0% de substituição). Os demais traços sofreram substituições da massa da areia em 100%. As sugestões de traço para argamassa de revestimento foram retiradas de Recena (2012), adotando-se os traços 1:2:8, 1:2:9 e 1:2:10 (cimento:cal:areia).

Para a conversão do traço em volume para traço em massa realizaram-se os seguintes cálculos para cada material:

$$V = \frac{M}{\delta} \quad (4)$$

Onde,

δ é a massa unitária de cada material;

M é a massa em g;

V é o volume do material;

A argamassa produzida seguiu os traços definidos de acordo com a Tabela 7, e o consumo de cada material foi calculado para o corpo de prova prismático de 4 cm x 4 cm x 16 cm (256 cm³ de volume).

Tabela 7 – Traço em volume e em massa das argamassas produzidas.

		Cimento	Cal	Areia (100 % resíduo)
Traço 128	Volume	1	2	8
	Massa (g)	1	0,71	9,09
Traço 129	Volume	1	2	9
	Massa (g)	1	0,71	10,22
Traço 1210	Volume	1	2	10
	Massa (g)	1	0,71	11,36

3.2.6 Ensaios de Argamassa no Estado Fresco

3.2.6.1 Índice de Consistência

Antes da produção dos corpos de prova, foi realizado o ensaio de espalhamento que seguiu a NBR 13276 (2005), que consiste em dispor o material em um tronco de cone metálico em três camadas com alturas aproximadamente iguais e aplicar 15, 10 e 5 golpes respectivamente em cada camada. Após a retirada do molde aplicou-se 30 golpes em 30 segundos na mesa e por fim mediu-se o diâmetro médio depois do escorregamento. Nesse ensaio verificou-se que quanto maior o diâmetro, menor a consistência.

3.2.6.2 Densidade e Teor de Ar Incorporado

O ensaio de densidade de massa no estado fresco segue a NBR 13278 (2005) que estabelece que imediatamente após a preparação da argamassa, esta deve ser introduzida em um recipiente cilíndrico com capacidade de aproximadamente 400 cm³ com altura de 85mm e diâmetro de 20 mm. A argamassa foi aplicada na forma em três camadas com alturas aproximadamente iguais e com a aplicação de 20 golpes em cada uma. Após o golpeamento de cada camada, o recipiente sofreu três quedas com altura de aproximadamente 3 cm com a finalidade de eliminar os vazios entre a

argamassa e a parede do recipiente e então realizou-se o registro da massa do recipiente com a argamassa. A densidade da massa foi calculada em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3) através da expressão:

$$D = \frac{m_c - m_v}{V_r} * 1000 \quad (5)$$

Onde,

m_c é a massa do recipiente contendo a argamassa (g);

m_v é a massa do recipiente vazio (g);

V_r é o volume do recipiente (g);

O teor de ar incorporado na argamassa pode ser calculado durante a realização da verificação da densidade no estado fresco. Para tanto, aplica-se a expressão abaixo:

$$A = 100 \left(1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad (6)$$

Onde,

d é o valor da densidade de massa da argamassa (g/cm^3);

d_t é o valor de densidade de massa teórica da argamassa sem vazios (g/cm^3);

A norma diferencia a densidade de massa teórica das argamassas industrializadas e das argamassas dosadas e preparadas em obra, nesta pesquisa foi adotada este segundo método (argamassas preparadas em obra), calculado através da equação abaixo:

$$d_t = \frac{\sum m}{\sum \frac{m}{\delta}} \quad (7)$$

Onde,

m é a massa seca de cada componente, mais a massa da água (g);

δ é a massa específica de cada componente da argamassa;

3.2.7 Ensaios de Argamassa no Estado Endurecido

O processo de moldagem e cura dos corpos de prova seguiram o estabelecido na NBR 13279 (2005), que avalia o comportamento do corpo de prova nas resistências à tração e à compressão. De acordo com esta norma, imediatamente após o preparo, a argamassa deve ser disposta em moldes prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm (Figura 24), nivelados em duas camadas e adensados em uma mesa de adensamento com 30 golpes para cada camada. Para o processo de cura, os moldes permaneceram entre 48 e 24 horas a temperatura de 23°C (+- 2°C) e umidade relativa do ar de 60% (+-5%), após este prazo, os corpos de prova foram desmoldados e permaneceram no mesmo ambiente até o dia do ensaio.

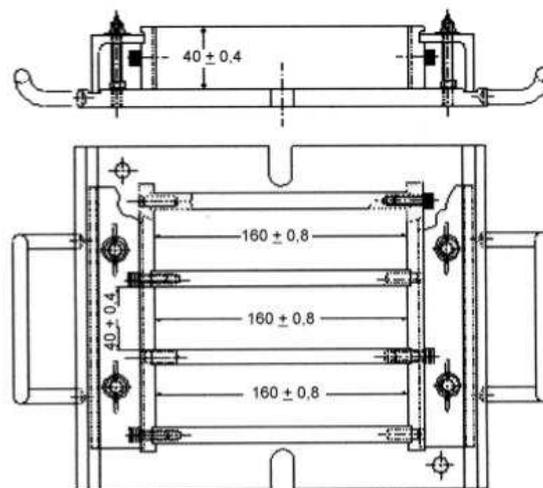


Figura 24: Vista superior e lateral da forma prismática para corpos de prova de argamassa (NBR 13279, 2005).

3.2.7.1 Densidade de Massa Aparente

O ensaio de densidade de massa aparente de argamassa de revestimento foi realizado seguindo a norma da NBR 13280 (2005), que estabelece os equipamentos e os métodos para execução do ensaio. Após a cura de 28 dos corpos de prova foi determinado através de um paquímetro, a altura, a largura e o comprimento de cada corpo de prova em duas posições. Então foi determinada a massa (m) em gramas de

cada corpo de prova com resolução de 0,1g. O resultado foi calculado em quilograma por metro cúbico (Kg/m³) de acordo com a seguinte expressão:

$$\rho = \frac{m}{v} 1000 \quad (8)$$

Onde,

ρ é a massa aparente da argamassa (Kg/m³);

m é a massa do corpo de prova (g);

v é o volume do corpo de prova (cm³);

3.2.7.2 Resistência à Tração na Flexão

Os ensaios de resistência à tração na flexão e o de resistência à compressão são realizados conforme estabelecido na norma da NBR 13279 (2005). De acordo com a última atualização na norma, os ensaios devem ser realizados em corpos de prova prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm e com auxílio de um dispositivo acoplado a prensa, ambos os ensaios podem ser realizados no mesmo corpo de prova, garantindo assim uma maior eficiência na obtenção dos resultados.

A norma recomenda a realização dos ensaios com os corpos de prova em idade de 28 dias, porém, para esta pesquisa foi adotado também a idade de 7 dias de cura. O corpo de prova foi posicionado no dispositivo próprio para ensaio de tração na flexão acoplado à prensa. Este dispositivo dispõe dois suportes de aço cilíndricos com 50 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro na parte inferior, distantes entre si por 100 mm. Um terceiro suporte cilíndrico de mesma dimensão foi posicionado no centro destes dois primeiros suportes na parte superior do corpo de prova. O esquema dos apoios dos suportes é descrito na Figura 25.

A resistência à tração na flexão é calculada conforme a expressão abaixo:

$$R_f = \frac{1,5F_f L}{40^3} \quad (9)$$

Onde,

R_f é a resistência à tração na flexão (MPa);

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L é a distância entre os suportes (mm);

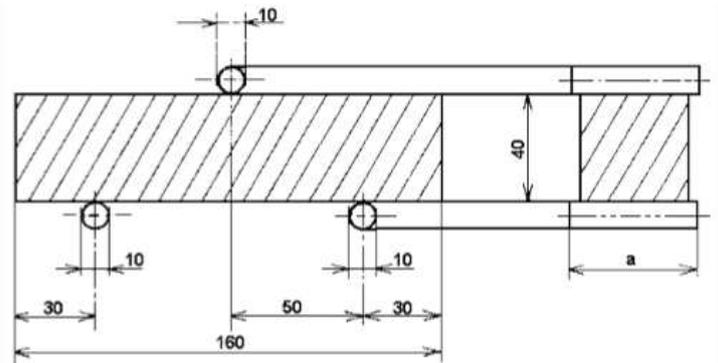


Figura 25: Esquema dos apoios do corpo e prova para ensaio de resistência à tração na flexão (NBR 13279, 2005).

A norma sugere que seja realizado o ensaio em no mínimo três corpos de prova e que o desvio absoluto máximo seja calculado. O desvio absoluto máximo foi obtido através da diferença entre a resistência média obtida de todos os corpos de prova ensaiados e a menor e maior resistência individual obtida. Segundo a norma, o desvio absoluto máximo não deve ser superior a 0,3 MPa, ocorrendo tal situação deve ser retirada uma nova média com no mínimo dois corpos de prova, desconsiderando o valor discrepante.

3.2.7.3 Resistência à Compressão

Conforme descrito no item anterior, a resistência à compressão axial foi realizada nos mesmos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão. Para isso, foi necessário que fossem resguardadas cada metade dos corpos de prova ensaiados previamente. Cada metade do corpo de prova resultante do ensaio de flexão foi posicionado na prensa, apoiados (no topo e na base) por chapas de aço nas dimensões (40 cm x 40 cm x 5 mm) com o objetivo de restringir a área de contato onde a carga foi aplicada, uma vez que as metades resultantes apresentaram forma irregular após o ensaio de flexão.

A resistência à compressão é calculada conforme a equação abaixo:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (10)$$

Onde,

R_c é a resistência à compressão (MPa);

F_c é a carga aplicada (N);

1600 é a área da seção considerada dos corpos de prova (mm);

Seguindo as orientações para o ensaio de resistência à tração na flexão, foram calculados também o desvio absoluto máximo dos seis corpos de prova ensaiados. Para os ensaios de resistência à compressão axial, o desvio absoluto máximo não deve ser superior a 0,5MPa, ocorrendo tal situação deve ser retirada uma nova média com no mínimo quatro corpos de prova, desconsiderando o valor discrepante.

3.2.7.4 Absorção de Água e Coeficiente de Capilaridade e Porosimetria

A norma NBR 15259 (2005) estabelece os equipamentos e procedimentos para a realização do ensaio de absorção de água por capilaridade e a determinação do coeficiente de capilaridade da argamassa. Os corpos de prova com 28 dias de idade são lixados com uma lixa grossa e limpos com um pincel para que sejam determinadas as massas iniciais de cada um. Os corpos de prova são então posicionados com a face quadrada em uma lâmina de água constante com 5mm acima da face em contato com a água. Após a colocação dos corpos de prova em contato com a água são verificadas as massas de cada um aos 10 minutos e aos 90 minutos. A absorção de água por capilaridade é expressa em gramas por centímetro quadrado (g/cm²) e calculada através da expressão:

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{m_c} \quad (11)$$

Onde,

A_t é a absorção de água para cada tempo;

m_t é a massa do corpo de prova em cada tempo;

m_0 é a massa inicial do corpo de prova;

m_c a área da superfície do corpo de prova;

O coeficiente de capilaridade deve ser apresentado nos resultados do ensaio e é obtido aproximadamente através da diferença entre as médias das massas aos 10 e aos 90 minutos. O coeficiente é expresso em gramas por decímetro quadrado pela raiz quadrada de minuto ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$).

Deve ser calculado também o desvio relativo máximo da série de corpos de prova e expresso em porcentagem. Semelhante aos resultados de resistência, se o desvio for superior a 20% deve-se calcular uma nova média desprezando o valor discrepante e adotando uma nova média com no mínimo dois corpos de prova.

A porosimetria por intrusão de mercúrio foi realizada pelo Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas da Universidade Federal de Santa Catarina. Foram enviadas duas amostras para análises, uma com 0% de substituição do agregado (amostra A) e outra com 100% de substituição (argamassa B). Os parâmetros adotados foram 50 μmHg de pressão de evacuação durante 5 minutos e uma pressão de preenchimento de mercúrio de 0.0034 MPa.

3.2.7.5 Potencial de Aderência a Tração

O ensaio de potencial de aderência a tração verifica a tensão máxima que uma argamassa pode suportar sem perder sua aderência ao substrato. A norma NBR 15258 estabelece as condições e equipamentos necessários para a realização deste ensaio.

Foram aplicadas duas camadas da argamassa sobre o substrato de, aproximadamente, 5 mm de espessura cada uma. Após a aplicação da argamassa a superfície foi rasada com uma régua para obter uniformidade na superfície. Os substratos revestidos com a argamassa sofreram um processo de cura de 28 dias para que fossem realizadas as rupturas. Cerca de três dias antes da idade desejada foram realizadas as colagens e o corte dos corpos de prova que sofreram o arrancamento. A colagem das peças metálicas (pastilhas) que serviram de apoio para o equipamento foi realizada com cola epóxi e o corte realizado a seco penetrando aproximadamente 1mm em direção ao substrato. A Figura 26 apresenta o esquema de montagem do equipamento para realização do ensaio de aderência à tração.

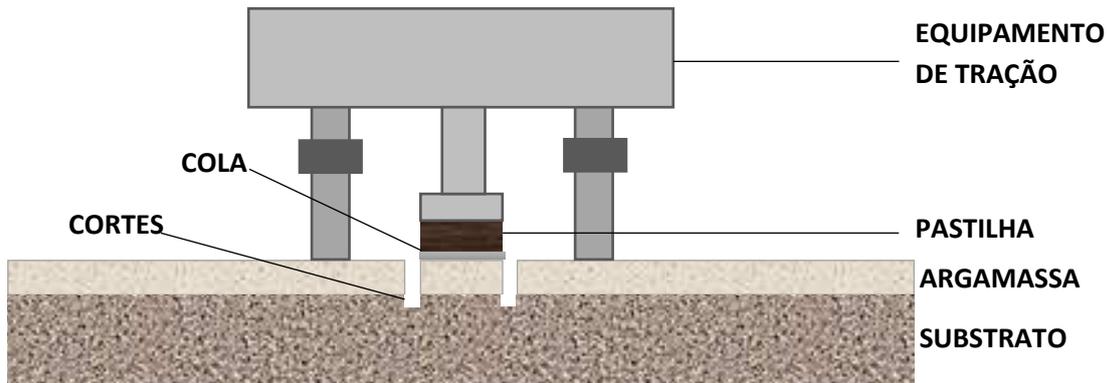


Figura 26: Esquema para realização do ensaio de aderência à tração.

Foram ensaiados dez corpos de prova espaçados em no mínimo 40 mm das bordas e 20 mm entre si, o equipamento que verifica a tração foi acoplado à cada pastilha. Após a realização do arrancamento foram registrados a carga de ruptura, a área superficial de cada corpo de prova e a forma como ocorreu a ruptura. A forma de ruptura recebeu a seguinte classificação:

S – ruptura no substrato;

S/A – ruptura na interface substrato/argamassa;

A – ruptura na argamassa;

F – falha na colagem da pastilha;

O cálculo do potencial de aderência à tração foi realizado seguindo a seguinte expressão:

$$R_i = \frac{P_i}{A_i} \quad (12)$$

Onde,

R_i é a resistência de aderência à tração (MPa);

P_i é a carga de ruptura expressa em número inteiro (N);

A_i é a área do corpo de prova expressa em número inteiro (mm²);

O cálculo da média das resistências foi realizado desprezando-se os valores que se afastaram 30% da média obtida de no mínimo cinco valores validos.

3.2.7.6 Ciclos de molhagem e secagem

Considerando que a argamassa produzida tem como principal aplicação o revestimento de paredes, a realização de ciclos de molhagem e secagem em corpos de prova auxiliou na verificação do comportamento da argamassa diante das intempéries diárias.

Ciclos de alternância de 24 horas de forno em temperatura elevada e 24 horas de imersão em água simulam variações climáticas extremas. Para esta pesquisa foi adotada a temperatura de 65°C para a estufa.

Após 28 dias de cura, os corpos de prova foram submetidos aos ciclos de 24 horas em forno e 24 horas imersos em água, o que contabilizou o primeiro ciclo. A verificação da perda de massa e da redução nas resistências à tração na flexão e à compressão simples foram verificadas após 0, 5, 10, 15, 20 e 25 ciclos.

3.2.7.7 Reação álcali-agregado

Conforme descrito no capítulo anterior, alguns agregados podem ser reativos com os álcalis do cimento e ocasionar um fenômeno patológico conhecido como reação álcali-agregado. Existem diferentes métodos normatizados para prevenir e avaliar as reações álcali-agregado em concretos e em argamassas. A NBR 15577-4 (2009) prescreve que, após a caracterização do agregado, deve-se realizar o ensaio acelerado em barras de argamassa. Nesta pesquisa foi adotado esse ensaio em barras como um dos ensaios para verificação da reação álcali-agregado na argamassa produzida.

De acordo com a norma o agregado deve sofrer, quando necessário, um processo de britagem para que sejam obtidos os percentuais de agregados de acordo com os valores apresentados na Tabela 08. Cada percentual retido foi lavado com água para remover o pó e as partículas finas do agregado foram secas e armazenadas separadamente em recipientes limpos e fechados.

Tabela 8: Granulometria requerida do resíduo para o ensaio.

Abertura da peneira	Quantidade de material em massa	
Retido	%	grama

2,36mm	10	99,0
1,18mm	25	247,5
600µm	25	247,5
300µm	25	247,5
150µm	15	148,4
TOTAL	100	990,0

Fonte: Adaptado de NBR 15577-4 (2009).

Para a moldagem das barras, a norma orienta uma relação cimento/agregado de 1:2,25 (440 g e 990 g, respectivamente) para agregados com massa específica igual ou superior a 2,45 g/cm³, o que se enquadra o resíduo de Scheelita, cuja massa específica será apresentada no próximo capítulo. O cimento utilizado deve ser passado na peneira de malha 850 µm e a relação água/cimento é fixa de 0,47.

A mistura dos materiais foi mecânica, iniciando-se com toda a água e o cimento por trinta segundos. Após este tempo, colocou-se as frações do agregado já homogeneizadas e foram misturados em velocidade alta por também trinta segundos. Após esse tempo, a argamassa foi colocada em repouso por um minuto e meio, coberta por um pano limpo e úmido, e então colocada no misturador mecânico novamente por mais um minuto.

A moldagem da argamassa foi feita em moldes prismáticos de secção quadrada medindo 25 mm x 285 mm próprios para ensaio de reação álcali-agregado e adensadas em duas camadas, recebendo 20 golpes de soquete cada uma. Depois da última camada ser adensada, realizou-se o rasamento e o alisamento da superfície com uma espátula. Os moldes foram dispostos em câmara úmida e após 24 horas da moldagem, as barras foram desformadas e registrada a primeira medição.

Os corpos de prova da argamassa foram colocados em um recipiente para cura em uma solução de NaOH sem que encostem nas paredes do recipiente ou que sejam apoiadas pelo pino do molde. Estes moldes foram colocados em banho termorregulador a 80 (±2) °C. Os corpos de prova permaneceram nessa condição por 24 horas. Após esse período de estabilização, foram removidos do recipiente de cura, uma de cada vez, e registrados os seus comprimentos em sala climatizada a (23±2)°C, perfazendo com que a leitura fosse obtida ainda sob a 80°C. Segundo a norma deverão

ser realizadas leituras nas idades 16 e 30 dias, contados a partir da moldagem, porém para esta pesquisa, foram realizadas leituras a cada 2 dias, totalizando 15 leituras.

Os resultados de cada corpo de prova foram expressos em porcentagem com aproximação de 0,001% e a média obtida pelas leituras de no mínimo três corpos de prova com aproximação de 0,01%. De acordo com a norma, se o resultado obtido no ensaio indicar expansão menor que 0,19% aos 30 dias de idade, o agregado pode ser considerado potencialmente inerte para uso em argamassas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos Materiais

4.1.1 Análise Física

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados da distribuição granulométrica, modulo de finura e a dimensão máxima do resíduo de Scheelita.

Tabela 9: Distribuição granulométrica do resíduo de Scheelita

Resíduo de Scheelita								
Amostra 1 (500g)				Amostra 2 (500g)			Média	Areia Natural
Peneira (mm)	Material retido (g)	% Retido	% Acumulado	Material retido (g)	% Retido	% Acum.	% Acumulado	% Acumulado
4.8	0.3	0.1	0.1	0	0	0	0.05	0.8
2.4	0.4	0.1	0.2	0.7	0.2	0.2	0.2	2.7
1.2	33.2	6.7	6.9	40.7	8.1	8.3	7.6	14.8
0.6	122.7	24.6	31.5	135.2	27.0	35.3	33.4	33.2
0.3	154.7	31.0	62.5	146.4	29.3	64.6	63.55	68.4
0.15	133.5	26.7	89.2	122.0	24.4	89	89.10	90.1
Fundo	53.9	10.8	100	54.8	11.0	100	100	100
Total	498.7	100		499.8	100			

Dimensão máxima característica = 2.4 mm

Módulo de Finura = 2.93

Observando os valores apresentados na distribuição granulométrica, verifica-se que as duas amostras apresentaram diâmetro máximas característica de 2,4 mm. A distribuição granulométrica evidenciou que o maior percentual de material retido fica na peneira com abertura de 300 μ m (Figura 27). O modulo de finura encontrado foi de 2.93 sendo classificado como areia grossa segundo a norma que orienta o ensaio de granulometria (NBR NM 248, 2003).

As massas específicas e unitárias do resíduo apresentaram resultados de 2.90 g/cm^3 e 1.67 g/cm^3 respectivamente. Logo, esse agregado é classificado como agregado normal pois sua massa unitária se encontra no intervalo $1 \leq \gamma \leq 3 \text{ g/cm}^3$, o agregado normal sendo o mais indicado para a fabricação de argamassas.

A análise granulométrica do resíduo é fundamental para o processo de dosagem dos traços e pode influenciar diretamente na quantidade de água requerida, na porosidade e por sua vez, na resistência e na durabilidade da argamassa produzida.

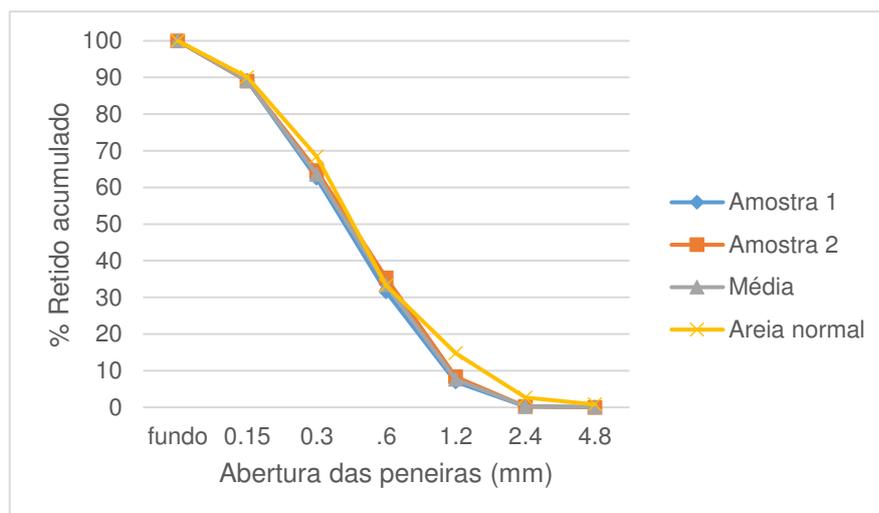


Figura 27: Distribuição granulométrica das amostras do resíduo de Scheelita e de uma amostra de areia normal.

Analisando a Tabela 10, verifica-se uma maior distorção de valores apenas na dimensão máxima característica (1.2 mm) encontrado em Paiva (2013). O valor representa que o resíduo utilizado na pesquisa do autor detém 5% do percentual acumulados mais próximos a peneira de abertura 1.2 mm. Os demais valores apresentados na Tabela 10, como massa unitária e específica, são bem semelhantes aos demais autores citados e aos valores encontrados nesta pesquisa.

Tabela 10: Resultados de análise granulométrica e massa específica e unitária do resíduo de Scheelita.

Autores	Dimensão máxima característica	Modulo de Finura	Massa específica	Massa unitária
Alves et al (2016)	2.36 mm	2.33	2.95 g/cm^3	1.61 g/cm^3
Medeiros (2016)	2.4 mm	1.73	2.83 g/cm^3	1.70 g/cm^3
Paiva (2013)	1.2 mm	1.83	2.89 g/cm^3	1.66 g/cm^3
Costa Filho (2017)	2.4 mm	2.90	2.98 /cm^3	-

4.1.2 Análise Térmica

A Figura 28 ilustra a curva de análise termogravimétrica (TG) do resíduo da Scheelita. Analisando a curva de TG verifica-se que o resíduo apresentou na temperatura de 100°C perda de massa de 0,8% correspondente a presença de água livre; perda de massa entre 600°C e 800°C de aproximadamente 18% correspondente a presença de carbonato.

Costa Filho (2017) analisou o resíduo de Scheelita em sua porção grossa e identificou uma perda de 0.195 mg massa aos 117°C e outra redução da massa aos 300°C, representando 0.157 mg. O autor não apresenta a representatividade dessa perda em percentuais relativos às massas iniciais.

Carlos (2018) identificou na análise termogravimétrica do resíduo de Scheelita uma perda mais acentuada a partir dos 700°C e relaciona a perda das hidroxilas e dos óxidos presentes na amostra (CaO, SiO₂, Fe₂O₃). Na curva DTG da amostra, o autor evidencia um pico a uma temperatura de aproximadamente de 780°C, indicando uma transformação de fase do resíduo e sugerindo uma temperatura máxima de trabalho de 750°C.

Em relação as curvas de DTG, a amostra apresentou um pico endotérmico próximo a temperatura de 800°C, correspondendo a presença de carbonatos, corroborando com os dados de Carlos (2018).

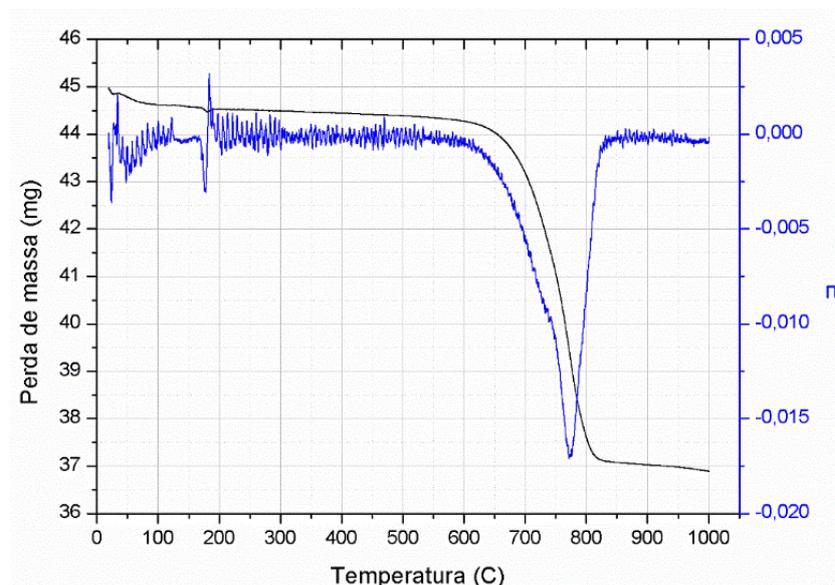


Figura 28: Análise Térmica do Resíduo da Scheelita no estado natural.

4.1.3 Análise Química e Mineralógica

Observa-se nos valores da Tabela 11, elevados teores presentes nos resíduos de óxido de cálcio ($\text{CaO} > 47\%$) proveniente da calcita e silício ($\text{SiO}_2 > 26\%$) oriundo do quartzo. Nas pesquisas de Paiva (2013) e Fernandes (2011), a composição química do resíduo assemelha-se bastante com os encontrados. Porém, em pesquisas desenvolvidas em outros países, a exemplo de Pacheco-Torgal et al (2008), a composição química do resíduo de Scheelita de Portugal difere bastante das amostras analisadas nesta pesquisa, mas assemelha-se aos valores encontrados por Silva et al (2018) e Almeida et al (2016) devido aos altos teores de SiO_2 .

Tabela 11: Composição química do resíduo de Scheelita.

Símbolo	Estado natural (não-fracionado)	Após moagem e calcinação de 2h (900 °C)
	Porcentagem (%)	Porcentagem (%)
CaO	47,30	39,46
SiO₂	31,82	37,72
Al₂O₃	9,75	9,63
Fe₂O₃	6,57	7,18
Sc₂O₃	--	--
MgO	2,46	3,12
Outros óxidos	2,08	2,07

A Figura 29 ilustra os padrões de DRX dos resíduos estudados na pesquisa (não-fracionado/estado natural e após calcinação). Os resultados indicam que os resíduos são compostos das seguintes fases mineralógicas: Quartzo (SiO_2), (JCPDS 46-1045); a Calcita (CaCO_3), (JCPDS 5-0586) e dois silicatos, a Albita (NaSi_3Al) (JCPDS 10-0393) e o Sanidina (NaKSi_3Al) (JCPDS 10-0357). Os picos de maior intensidade (quartzo e da calcita) coincidem com os difratogramas encontrados na literatura, porém os picos menores divergem, com a presença por exemplo de Ilita (Paiva, 2013), Octaclase (Silva et al, 2018) e Biotita (Fernandes, 2011).

Ainda na Figura 29 também são apresentados os difratogramas do resíduo após calcinação a 900°C. É possível identificar no resíduo calcinado o aumento dos picos de calcita, cuja temperatura de decomposição em aproximadamente 898°C

(Soares, 2007), o que demonstra que o processo de decomposição não estaria completo, necessitando um período maior de exposição.

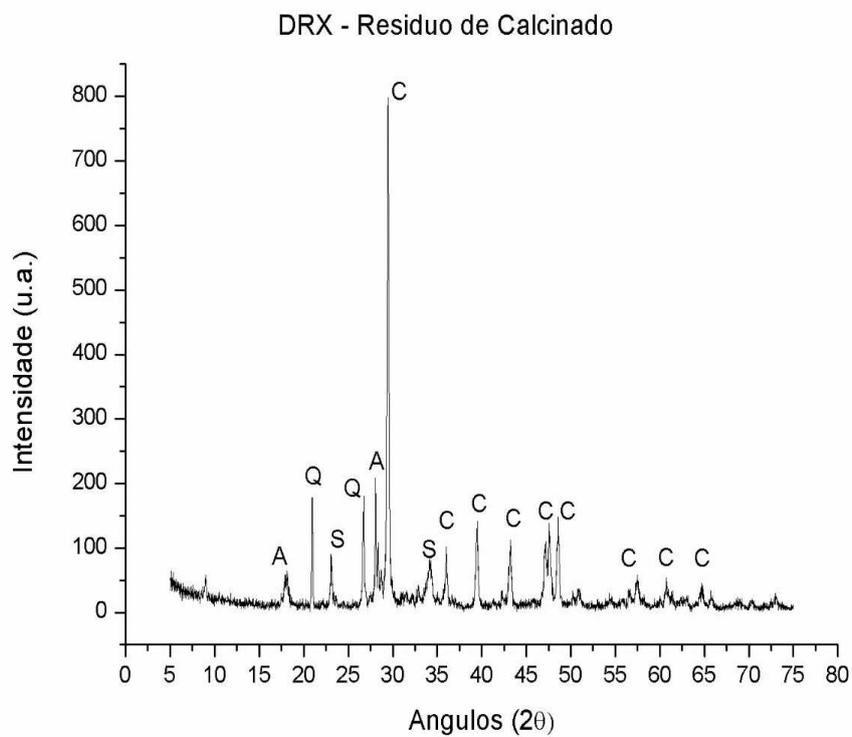
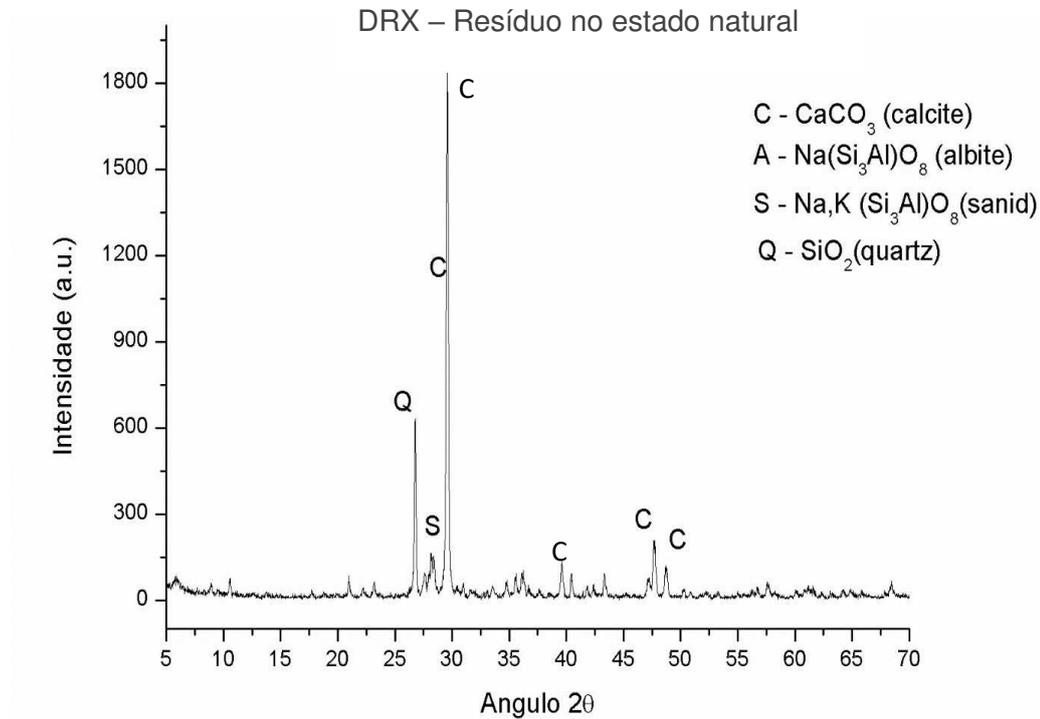


Figura 29: DRX do resíduo de Scheelita no estado natural.

4.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

As Figuras 30 e 31 ilustram as micrografias do resíduo de Scheelita e da areia natural utilizada nesta pesquisa. Verifica-se similaridade da morfologia entre os grãos de areia natural e o de resíduo Scheelita em seu estado natural. Ambos os grãos apresentaram partículas arredondada com algumas faces angulares. Foi possível identificar que a areia normal tem o tamanho mais homogêneo enquanto que os grãos de Scheelita são de tamanhos variados, onde essa variação pode ser atribuída provavelmente a presença de diferentes minerais.

Paiva (2013) identificou no MEV os grãos do resíduo de Scheelita como laminares e cúbicos e Costa Filho (2017) percebeu que os grãos têm formatos diversos, mas em sua grande maioria com arestas bem definidas e com superfície mais porosa que a areia normal.

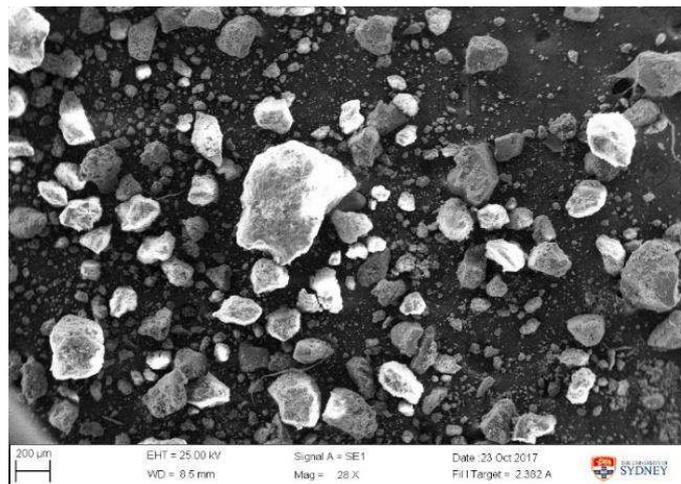


Figura 30: MEV dos grãos de areia normal.

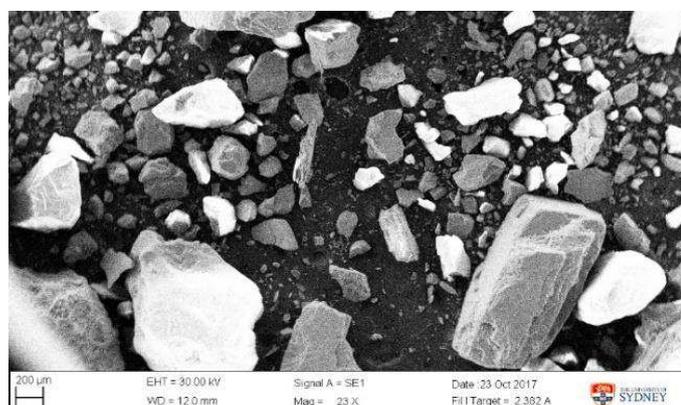


Figura 31: MEV dos grãos de resíduo de Scheelita.

Observa-se na Figura 32 uma morfologia do grão com bordas arredondadas e com estrutura laminar.

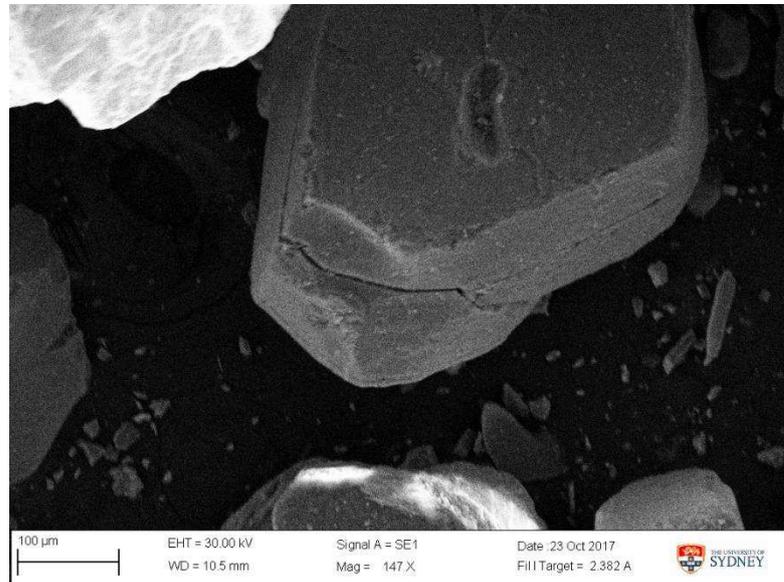


Figura 32: MEV bordas do grão do resíduo de Scheelita.

4.1.5 Análise Ambiental (ABNT NBR 10004/2004)

Na Tabela 12 estão contidos os valores obtidos na espectrometria e os parâmetros estabelecidos pela norma da ABNT NBR 10004.

Tabela 12: Resultado da análise de espectrometria por absorção atômica.

Parâmetros	Extrato lixiviado (mg/L)	Limite máximo estabelecido pela ABNT NBR 10004 (mg/L)	Extrato solubilizado (mg/L)	Limite máximo estabelecido pela ABNT NBR 10004 (mg/L)
Ba	0,69	70,0	<0,10	0,70
Al	<0,10	--	<0,10	0,20
Cu	0,55	--	0,014	2,0
Mn	1,15	--	0,047	0,1
Fe	0,070	--	<0,010	0,3
Zn	0,023	--	0,087	5,0
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	101,5	--	131,9	250
Cloretos (Cl ⁻)	525,4	--	503,4	250

Analisado os valores da Tabela 12, observa-se que os resíduos são classificados como não perigoso segundo norma da ABNT NBR 10004. Verifica-se

também uma forte presença de cloretos nas amostras pesquisadas. Os cloretos são agentes agressivos em estruturas de concreto armado, uma vez que causam a despassivação da armadura e, conseqüentemente, a sua corrosão, mas não interferem na durabilidade das argamassas de revestimento.

Costa Filho (2017) examinou por meio de EDS as amostras de resíduo de Scheelita e identificou a presença de Tungstênio em percentuais consideráveis (5% da massa), porém a porção examinada refere-se ao resíduo caracterizado em seu estado fino pela mineradora. Na porção caracterizada por areia grossa, objeto desta pesquisa, o autor não identificou a presença do metal, corroborando com os resultados dessa espectrometria.

4.1.6 Atividade Pozolânica

Na Tabela 13 estão contidos os valores da resistência a compressão dos corpos de prova submetidos a avaliação da atividade pozolânica do resíduo de Scheelita.

Tabela 13: Resistência à compressão de corpos de prova submetidos aos ensaios de atividade pozolânica.

Corpos de Prova	Resistência à compressão (MPa)
A1	19,37
A2	26,05
A3	23,30
Média dos corpos de prova da argamassa do tipo A	22,90 (MPa)
B1	19,31
B2	20,39
B3	19,45
Média dos corpos de prova da argamassa do tipo B	19,71 (MPa)
C1	19,46
C2	11,00
C3	21,80
Média dos corpos de prova da argamassa do tipo C	17,15 (MPa)

Diante dos resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica foi possível calcular o índice de atividade pozolânica para as argamassas do tipo “B” e do tipo “C”.

O índice encontrado de 84,06% e 74,90% respectivamente para as argamassas com resíduo no estado natural (B) e com resíduo calcinado (C).

Com a recente atualização (2015) da norma NBR 12653, o índice mínimo de atividade pozolânica com o cimento necessário para que o material fosse considerado pozolânico subiu de 75% (norma de 1992) para 95% (Figura 33). Assim, mesmo que o resíduo após sua calcinação, tenha ficado dentro das exigências químicas relativas a pozolana tipo E (Tabela 14), foi descartada sua utilização como material pozolânico diante dos resultados obtidos nos ensaios de atividade pozolânica com cimento. Desta forma, de acordo com a última versão da referida norma, foi desconsiderada a utilização do resíduo de Scheelita como material de substituição parcial do cimento ou como adição para a produção de argamassas, passando o objetivo desta tese a utilização do resíduo apenas como substituto do agregado.

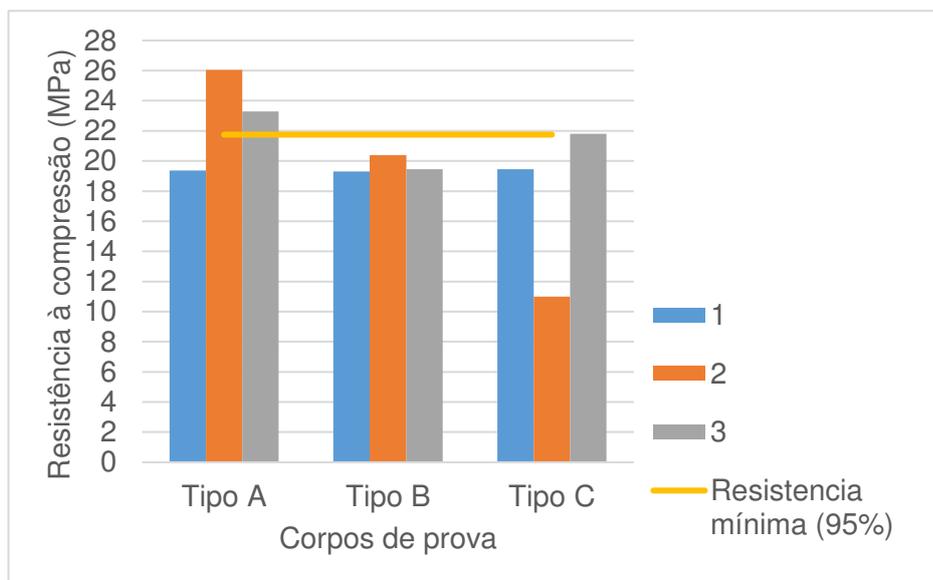


Figura 33: Resultado do ensaio de atividade pozolânica.

Tabela 14: Exigências para classificar um material como pozolânico.

EXIGENCIAS QUIMICAS	Parâmetros encontrados no resíduo de Scheelita				
	Natural	Calcinado			
Classes da norma ABNT NBR 12653	N	C	E	Natural	Calcinado
SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ (%min)	≥70	≥70	≥50	48,14	54,52
EXIGENCIAS FISICAS					
Índice de atividade pozolânica com o cimento aos 28 dias (%)	95	95	95	84,06%	74,90%

Fonte: Adaptado de NBR 12653 (2015).

4.2 Resultado dos Ensaio de Argamassa no Estado Fresco

4.2.1 Índice de Consistência

A Figura 34 ilustra o comportamento da argamassa com a incorporação do resíduo quando submetido a avaliação do índice de consistência das argamassas. Os índices de consistência para os três traços adotados resultaram em valores entre 258 mm e 261 mm (margem permitida pela norma). A relação água/cimento para cada traço manteve-se em 2.25, 2.0 e 2.64 respectivamente para os traços T128, T129 e T1210.

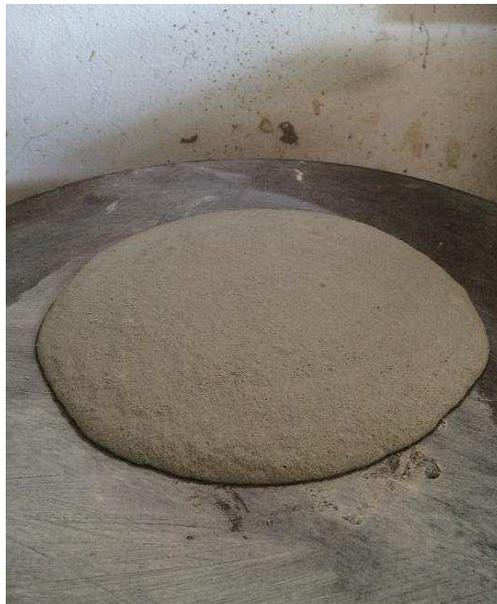


Figura 34: Argamassa ao atingir o espalhamento recomendado de 260 mm.

4.2.2 Densidade e Teor de Ar Incorporado

A Figura 35 apresenta resultados de densidade no estado fresco das argamassas incorporadas com resíduo de Scheelita utilizada nesta pesquisa. Após a definição da quantidade de água necessária para cada traço, foi realizado o ensaio de densidade no estado fresco. Analisando os valores da Figura 38, verifica-se que houve um aumento da densidade no estado fresco proporcional ao aumento da relação aglomerante/material seco. Esse fato ocorre devido à presença maior do resíduo na composição T1210, caracterizado pelo elevado valor de densidade da Scheelita.

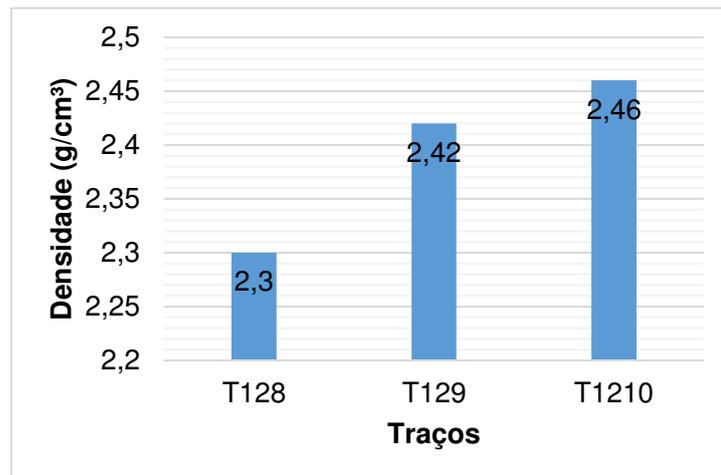


Figura 35: Resultados de ensaios de densidade no estado fresco.

Na Tabela 15 são apresentadas as quantidades utilizadas de cada material para a produção de 3 corpos de prova cilíndricos (5 cm x 10 cm).

Tabela 15: Quantidade em massa (g) de cada material utilizado na composição dos diferentes traços da argamassa.

Composição		Cimento	Hidróxido de cálcio	Agregado (resíduo)
T128	Volume	1	2	8
	Massa (g)	1.00	0.71	9.09
T129	Volume	1	2	9
	Massa (g)	1.00	0.71	10.22
T1210	Volume	1	2	10
	Massa (g)	1.00	0.71	11.36

Na Tabela 16 estão contidos os valores de densidades e teores de ar incorporados e as densidades no estado fresco e teórica para cada traço utilizados nesta pesquisa. Os percentuais encontrados para o teor de ar incorporado em cada traço demonstraram um decréscimo com relação ao aumento da quantidade de material seco. Quanto maior a relação aglomerante/material seco menor foi o percentual de ar incorporado encontrado na mistura. Relacionando o teor de ar com as densidades de cada traço, os valores também são inversamente proporcionais, quanto mais denso for o traço, menor foi o teor de ar incorporado encontrado na mistura. Altos valores de ar incorporado favorecem a trabalhabilidade das argamassas, porém podem comprometer a resistência mecânica uma vez que aumentam a porosidade das misturas. A utilização de aditivos aparece como alternativas para aumentar o teor de

ar incorporado sem prejudicar na resistência das argamassas. Os valores baixos encontrados ($\leq 10\%$) para os percentuais de ar incorporado refletem a decisão de não utilizar aditivos nas misturas propostas, mas ainda assim são considerados satisfatórios para a pesquisa, pois garantiram a trabalhabilidade das argamassas.

Tabela 17: Densidades e teores de ar encontrados para cada traço.

Traço	Densidade no estado fresco (g/cm ³)	Densidade teórica (g/cm ³)	Teor de ar incorporado (%)
1:2:8	2,30	2,57	10,50
1:2:9	2,42	2,60	6,92
1:2:10	2,46	2,62	6,10

4.3 Resultado dos Ensaio de Argamassa no Estado Endurecido

4.3.1 Densidade de Massa Aparente

A Figura 36 ilustra os valores densidade no estado endurecido das argamassas incorporadas com resíduos.

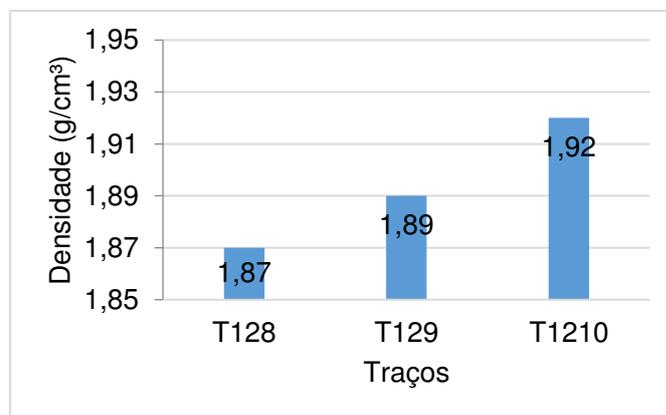


Figura 36: Densidade no estado endurecido corpos de prova incorporados com resíduos após cura de 28 dias.

Analisando os valores apresentados na Figura 39, verifica-se que foi possível identificar que houve um pequeno aumento da densidade para os traços que tiveram maior relação aglomerante/material seco. Esse resultado já era esperando diante dos resultados de densidade no estado fresco, justificando o traço T1210 como o de maior densidade.

4.3.2 Resistência à Tração na Flexão e Resistência à Compressão Axial

Na Tabela 18 são apresentados os resultados resistência à tração na flexão e compressão axial obtidos individualmente, bem como a média para cada traço para 7 e 28 dias de cura.

Tabela 18: Resistência à tração na flexão e compressão axial aos 7 e 28 dias de cura.

TRAÇO	Corpo de Prova	Resistência aos 7 dias			Resistência aos 28 dias		
		Tração na flexão (MPa)	Compressão (MPa)		Tração na flexão (MPa)	Compressão (MPa)	
T128	A	0,89	2,79	2,80	1,19	3,30	3,31
	B	0,88	2,84	2,84	0,93	3,24	3,23
	C	0,88	2,82	2,81	1,05	3,05	3,04
	D	0,88	2,80	2,81	1,14	3,07	3,06
	E	0,87	2,80	2,80	0,98	3,16	3,17
	F	0,89	2,78	2,79	1,14	3,24	3,23
Média		0,88	2,80		1,07	3,17	
Desvio Absoluto		0,01 – 0,01	0,02 – 0,4		0,12 – 0,14	0,12 – 0,14	
T129	A	0,83	2,68	2,67	0,98	3,05	3,04
	B	0,83	2,65	2,64	1,10	3,04	3,04
	C	0,82	2,63	2,63	0,93	2,94	2,93
	D	0,84	2,70	2,71	0,89	3,06	3,05
	E	0,84	2,65	2,64	0,91	3,04	3,02
	F	0,82	2,66	2,66	0,91	3,03	3,04
Média		0,83	2,66		0,95	3,02	
Desvio Absoluto		0,01 – 0,01	0,03 – 0,05		0,06 – 0,15	0,04 - 0,09	
T1210	A	0,79	2,20	2,22	0,86	2,94	2,95
	B	0,78	2,12	2,11	0,93	2,93	2,94
	C	0,78	2,23	2,23	0,93	2,95	2,93
	D	0,75	2,19	2,18	0,91	2,99	2,98
	E	0,79	2,19	2,19	0,84	2,94	2,93
	F	0,78	1,98	2,05	0,86	2,94	2,95
Média		0,77	2,15		0,89	2,94	
Desvio Absoluto		0,02 – 0,02	0,17 – 0,08		0,04 - 0,05	0,01 – 0,05	

Os resultados obtidos são considerados válidos pois o desvio absoluto foi inferior ao máximo permitido para o ensaio de resistência à tração na flexão e resistência à compressão (0,30 MPa e 0,50 MPa respectivamente). Ficou evidenciada a redução de ambas as resistências conforme o aumento da fração de agregado, o que acontece normalmente nas composições de argamassas e concretos. Considerando que os três traços de argamassa produzidos apresentaram resultados de resistência a compressão superiores ao mínimo de 2,0 MPa exigido pela norma (ABNT NBR 13281:2005) após os 28 dias, foi adotado o traço 1:2:9 para ser submetido aos demais ensaios, pois

apresentou resultados mais satisfatórios que o traço 1:2:10 e mais econômico que o traço 1:2:8 por apresentar maior relação aglomerante/agregado.

A Figura 37 apresenta os corpos de prova após o ensaio de tração na flexão sendo submetidos ao ensaio de compressão, demonstrando o antes e o depois do corpo de prova.

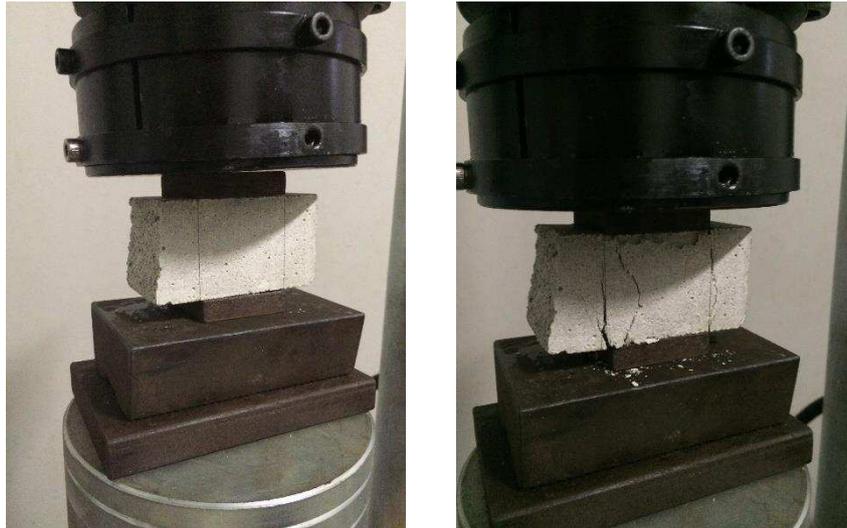


Figura 37: Antes e depois dos corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão.

4.3.3 Resultado das Ensaio de Absorção por capilaridade e porosimetria

Na Tabela 19 e na Figura 38 estão contidos os valores absorção de água e coeficiente de capilaridade dos corpos de prova com 100% de substituição e com 0% de substituição após cura de 28 dias.

Com a realização deste ensaio foi possível verificar que houve um aumento nos percentuais de absorção para a argamassa com 100% de substituição da areia normal por resíduo de Scheelita. O fator pode ser explicado devido a presença de mais poros na argamassa com Scheelita em relação a argamassa com areia normal, conforme apresentado nos resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio da Figura 39.

Os resultados da porosimetria de mercúrio indicaram que a argamassa do tipo A (com 0% de substituição) obteve 22,98% de porosidade e a tipo B (com 100% de substituição) apresentou 30,43%.

Tabela 19: Absorção por capilaridade dos corpos de prova incorporados com resíduos após cura de 7 e 28 dias.

Corpos de Prova (100% de substituição)	Absorção aos 10 min	Absorção aos 90 min	Coefficiente de capilaridade
A	0,14 g/cm ²	0,36 g/cm ²	7,2 g/dm ² .min ^{1/2}
B	0,15 g/cm ²	0,36 g/cm ²	7,6 g/dm ² .min ^{1/2}
C	0,13 g/cm ²	0,33 g/cm ²	7,0 g/dm ² .min ^{1/2}
D	0,14 g/cm ²	0,35 g/cm ²	7,6 g/dm ² .min ^{1/2}
E	0,16 g/cm ²	0,42 g/cm ²	8,4 g/dm ² .min ^{1/2}
F	0,13 g/cm ²	0,35 g/cm ²	7,5 g/dm ² .min ^{1/2}
Média	0,14 g/cm ²	0,36 g/cm ²	7,55 g/dm ² .min ^{1/2}
Desvio Relativo Máximo	14,28%	11,66%	11,25%
Corpo de Prova (0% de substituição)			
G	0,12 g/cm ²	0,32 g/cm ²	7,0 g/dm ² .min ^{1/2}
H	0,11 g/cm ²	0,32 g/cm ²	6,8 g/dm ² .min ^{1/2}
I	0,11 g/cm ²	0,31 g/cm ²	6,4 g/dm ² .min ^{1/2}
Média	0,11 g/cm ²	0,31 g/cm ²	6,7 g/dm ² .min ^{1/2}
Desvio Relativo Máximo	9,09%	3,22%	4,47%

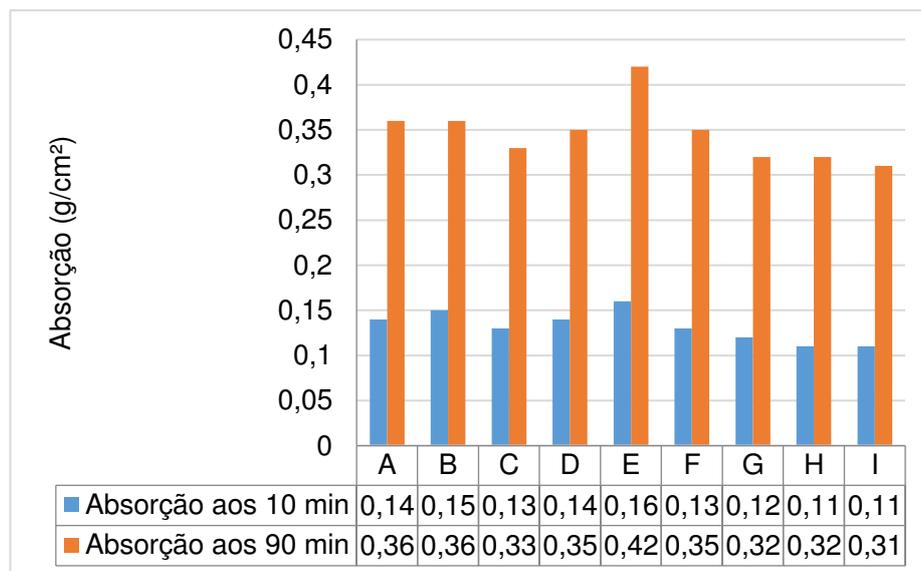


Figura 38: Absorção por capilaridade medido aos 10 e aos 90 minutos.

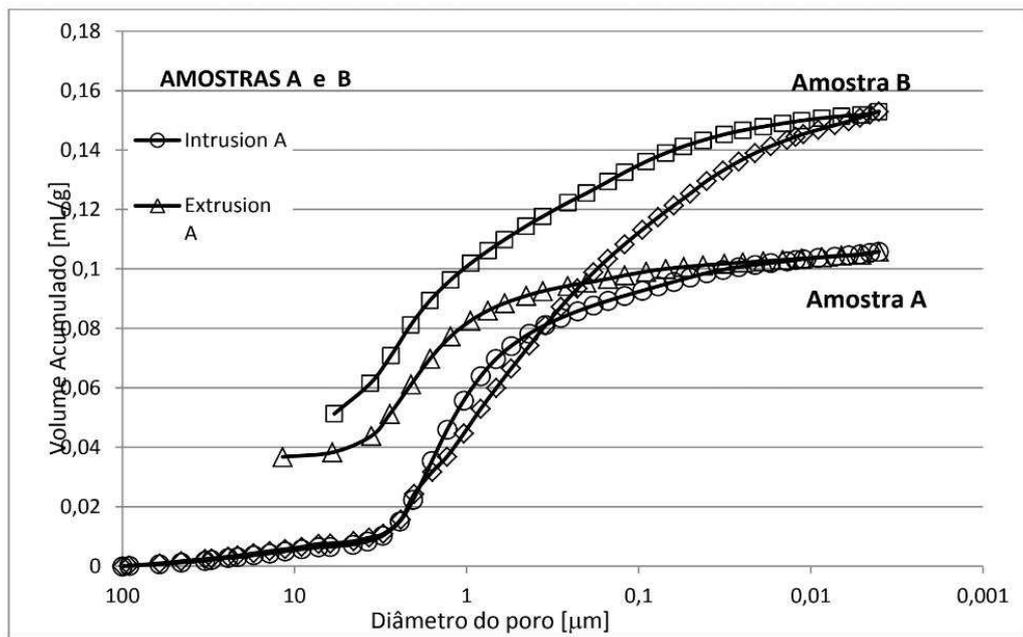


Figura 39: Valor acumulado da porosimetria na argamassa com 0% de substituição (amostra A) e com 100% de substituição (amostra B).

4.3.4 Potencial de Aderência a Tração

Para a realização do ensaio de potencial de aderência a tração foi confeccionada uma alvenaria de blocos cerâmicos medindo 1 m x 1 m revestidas com uma camada de chapisco (Figura 40).

Foram realizadas duas extrações, uma com a substituição de 100% da areia pelo resíduo de Scheelita e outro com o mesmo traço, porém sem substituição. Na Tabela 19 são apresentados os valores registrados para cada tipo de ensaio, os valores destacados em vermelho foram desprezados por estarem fora da margem de 30% da média, e os corpos de prova sem valor sofreram algum dano durante o ensaio também foram desprezados.



Figura 40: Alvenaria utilizada para ensaio de potencial de aderência à tração.

Tabela 20: Resultados de resistência de aderência à tração e o tipo de ruptura.

Amostras	Com Scheelita		Com areia natural	
	Carga (kgf)	Resistência (MPa)	Carga (kgf)	Resistência (MPa)
1	57	0.28	60	0.29
2	24	0.11	35	0.16
3	35	0.17	39	0.19
4	39	0.19	-	-
5	57	0.28	37	0.18
6	57	0.28	48	0.23
7	-	-	47	0.24
8	48	0.23	57	0.28
9	47	0.23	24	0.11
10	-	-	-	-
11	60	0.29	57	0.28
12	60	0.29	58	0.28
Desvio máximo		0.30		0.28
Média		0.23		0.22
Desvio Mínimo		0.16		0.15
Valor médio dos corpos de prova válidos		0.24		0.23

Outra característica que deve ser observada no ensaio de aderência é a forma como ocorreu a ruptura. A ruptura pode ocorrer no substrato (S), na interface do

substrato e a argamassa (S/A) e na argamassa (A). A Figura 41 evidencia que a maioria dos corpos de prova submetidos ao ensaio sofreram ruptura na argamassa, e apenas o corpo de prova 12 sofreu ruptura parcial no substrato. Para a verificação do percentual da área que sofreu ruptura no substrato, foram analisadas as imagens e traçadas perimetrais com o auxílio do software AutoCAD, Figura 42. Ficou constatado que 4.13 cm² da área da superfície do corpo de prova sofreu ruptura no substrato, aproximadamente 20% da área. Este fato indica que a grande maioria das rupturas ocorreram na argamassa e reflete que a camada de revestimento não pode ser muito espessa, pois pode ocasionar destacamento.

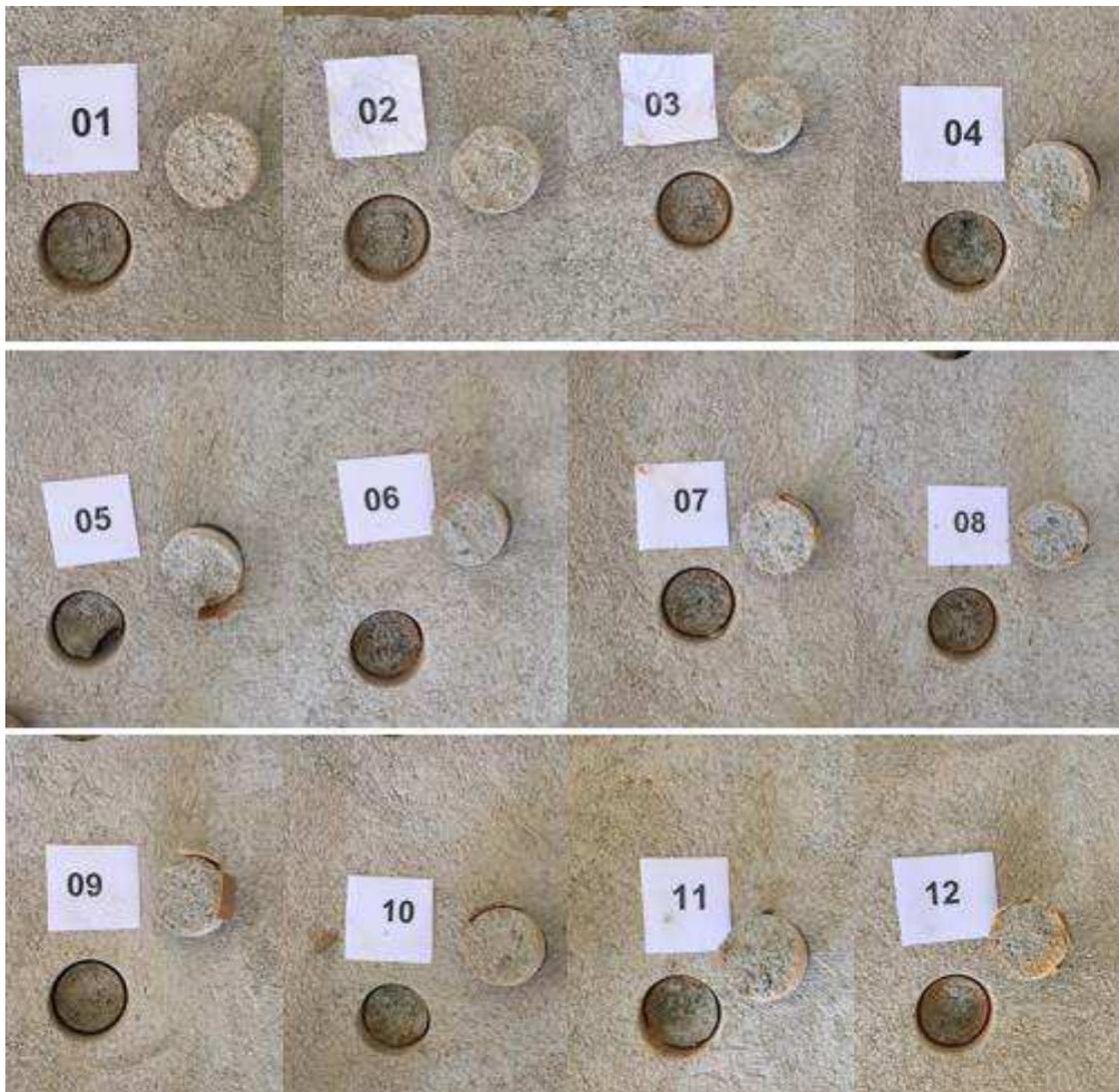


Figura 41: Corpos de prova submetidos ao ensaio de aderência.



Figura 42: Detecção da área de ruptura no substrato.

4.3.5 Ciclo de molhagem e secagem

A Figura 43 ilustra os resultados da durabilidade por meio do ciclo de molhagem secagem das argamassas utilizadas nesta pesquisa.

Analisando os resultados de tração na flexão e de compressão obtidos após a argamassa ser submetida aos ciclos, percebe-se que não houve perda no desempenho mecânico.

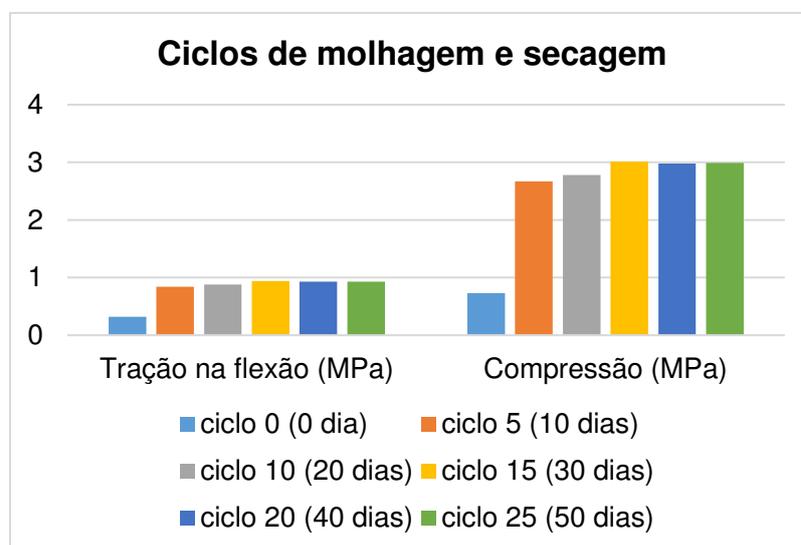


Figura 43: Resultado do desempenho mecânico da argamassa após os ciclos.

Comparando os dois resultados do desempenho da argamassa (com e sem os ciclos) é possível perceber que os valores médios referentes a tração na flexão e compressão mantem-se entre 1.0 Mpa e 3.0 MPa (respectivamente). Outra observação relacionada a este ensaio diz respeito a perda de massa que a argamassa pode ter

diante dos ciclos. Observando a Figura 44, percebe-se que houve uma perda de massa do material, mas que ficou em torno de 1% da massa inicial.

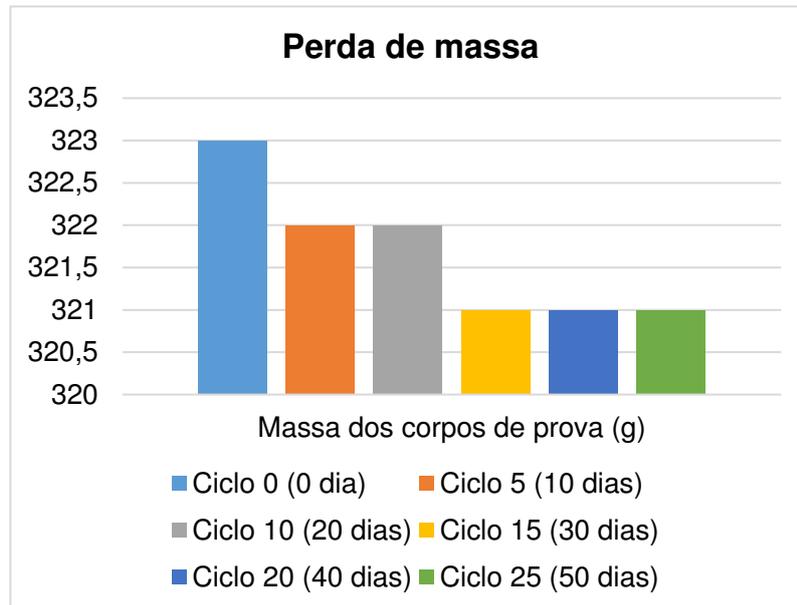


Figura 44: Perda de massa em relação aos ciclos.

4.3.6 Reação álcali-agregado (RAA)

O resultado do fracionamento requerido pela norma NBR 15577-4 (2009) está representado na Figura 45.

De acordo com a norma NBR 15577-4 (2009), a variação da expansão das barras em cada idade é obtida pela diferença de seu comprimento na idade analisada e o comprimento inicial da barra (24h de idade), com aproximação de 0,001%. Após a obtenção da variação de cada barra, foi feita a média entre os valores das três barras e calculada a expansão para cada idade, com aproximação de 0,01%.

Ainda segundo a norma, quando os percentuais de expansão forem acima de 0,20% o agregado pode ser considerado reativo para uso em concretos. Os três corpos de prova ensaiados apresentaram após o 16º dia, expansão acima dos 0,10%, o que refletia uma tendência em apresentarem reatividade ao final do processo. Aos 30 dias de ensaio, as três barras de argamassa apresentaram expansão superior à 0,20%, caracterizando o material reativo para uso em concretos (Figura 46).

Apesar dos percentuais de expansão ultrapassarem o limite máximo estabelecido pela norma recomenda-se um aprofundamento sobre o potencial de reatividade do resíduo.



Figura 45: Frações do resíduo com diferentes granulometrias para o ensaio de expansão de barras.

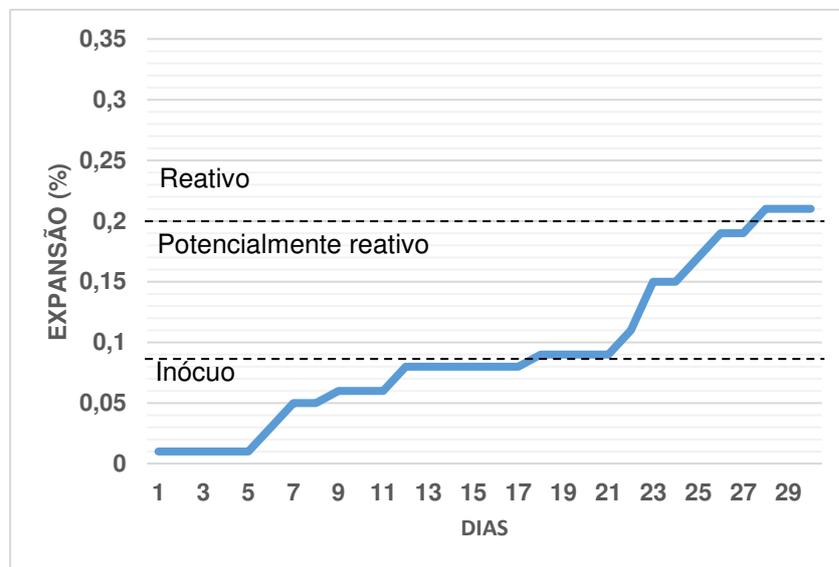


Figura 46: Variação da expansão e as faixas que representam a reatividade do material.

Analisando suas características físicas (fases presentes) e químicas (fluorescência) o material não apresentou grandes percentuais de fases amorfas, e a

sílica presente estava em percentuais baixos, fatores que poderiam influenciar na reatividade com soluções alcalinas. Outro ponto importante para se destacar foi a não identificação de formação de “géis” na superfície dos corpos de prova.

As Figuras 47 e 48 ilustram as imagens obtidas por elétrons espelhados (SE), onde foi possível identificar os poros das amostras, os agregados (resíduo de Scheelita) e os produtos de hidratação da pasta de cimento, tais como o hidróxido de cálcio (C-H), silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e a etringita (C-A-S-H).

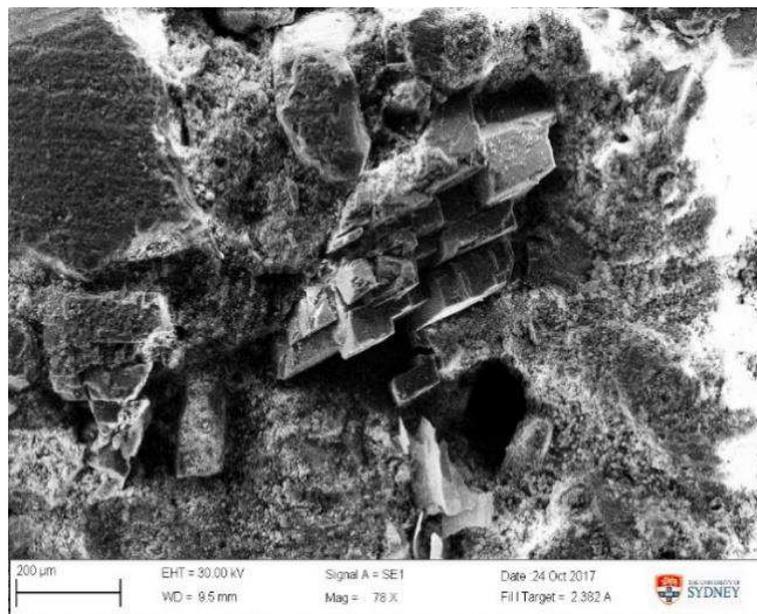


Figura 47: MEV de amostra de argamassa com a identificação de cristais de Hidróxido de Cálcio (C-H).

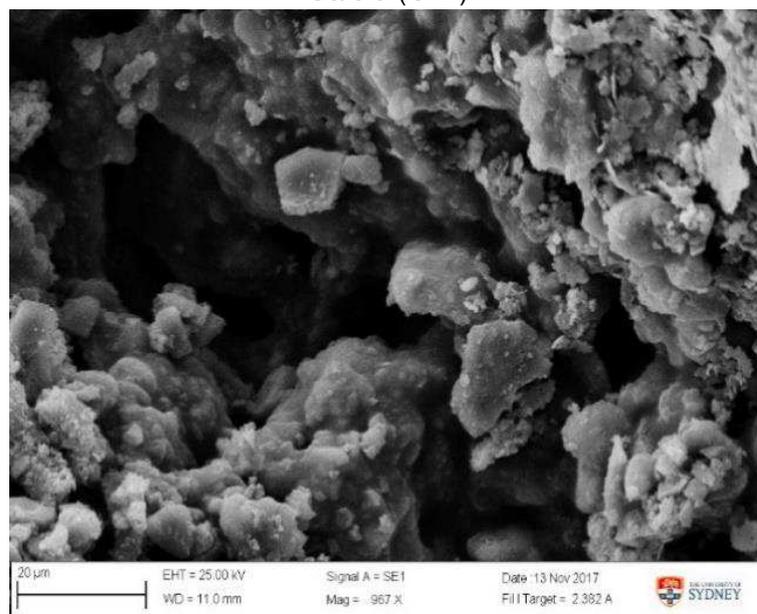


Figura 48: MEV de amostra de argamassa com a identificação de vazios sem a presença de géis deletérios.

A Figura 49 ilustra fissura na pasta de cimento e a indicação de pontos que foram investigados por EDS.

Em algumas imagens obtidas por elétrons retroespehados de amostras polidas foi possível identificar algumas fissuras que poderiam ser resultantes de um processo expansivo deletério. Foram coletadas três regiões que apresentaram fissuras em suas amostras. Essas imagens foram analisadas por EDS e identificados a composição química da região da fissura.

A Figura 50 apresenta os elementos encontrados na região delimitada.

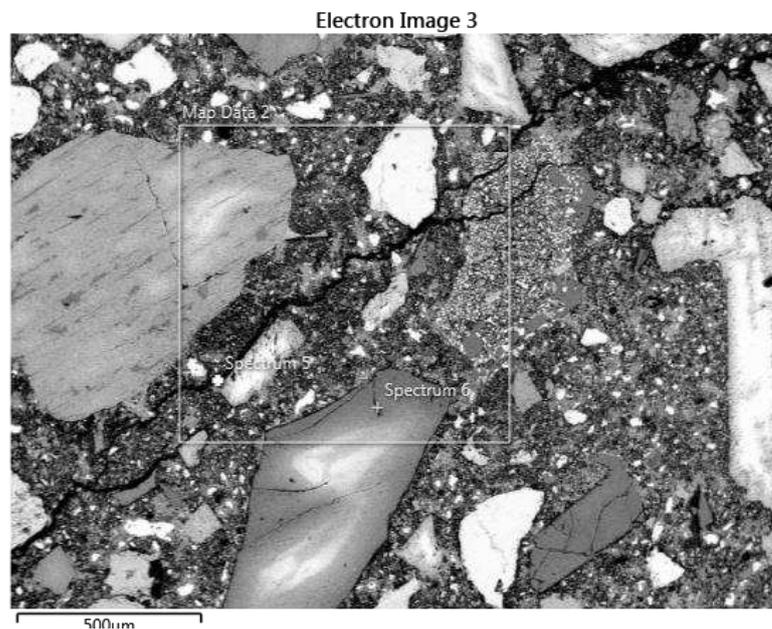


Figura 50: MEV da argamassa com resíduos de Scheelita com fissuras do processo deletério.

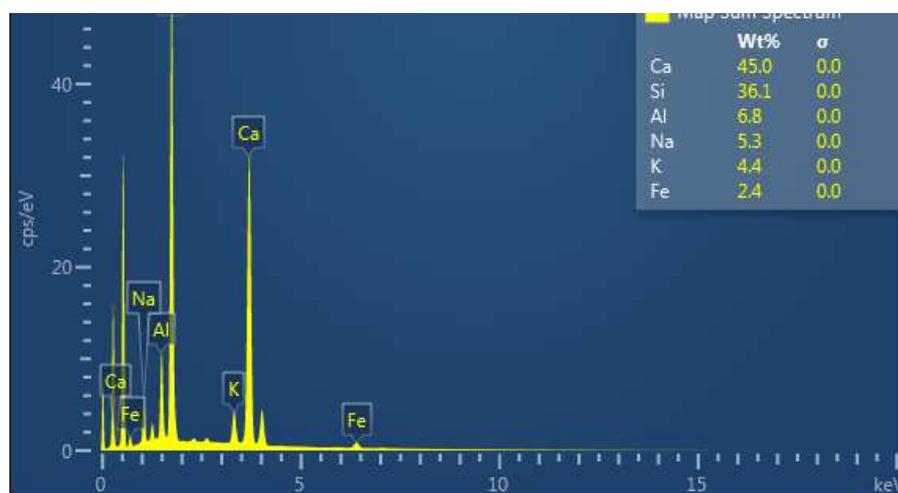


Figura 49: Elementos presentes na região delimitada.

A Figura 51 apresenta os percentuais dos elementos presentes no ponto 5 (Spectrum 5), localizado na fissura. A imagem indica a presença mais intensa de carbono, causada pelo processo de preparação da amostra.

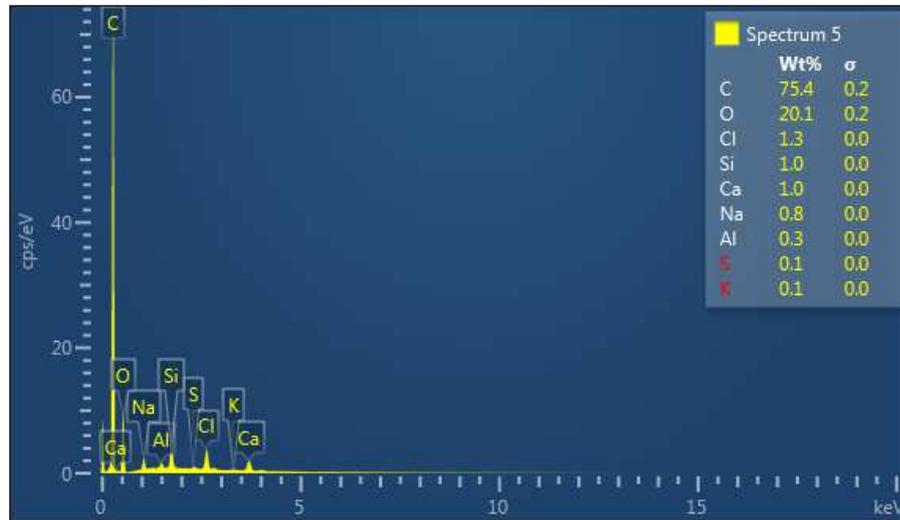


Figura 51: Elementos presentes no ponto localizado na fissura.

A Figura 52 apresenta os percentuais dos elementos presentes no ponto 6 (Spectrum 6), localizado sobre o agregado. A imagem indica a presença mais intensa de sílica, oriunda da mineralogia do agregado.

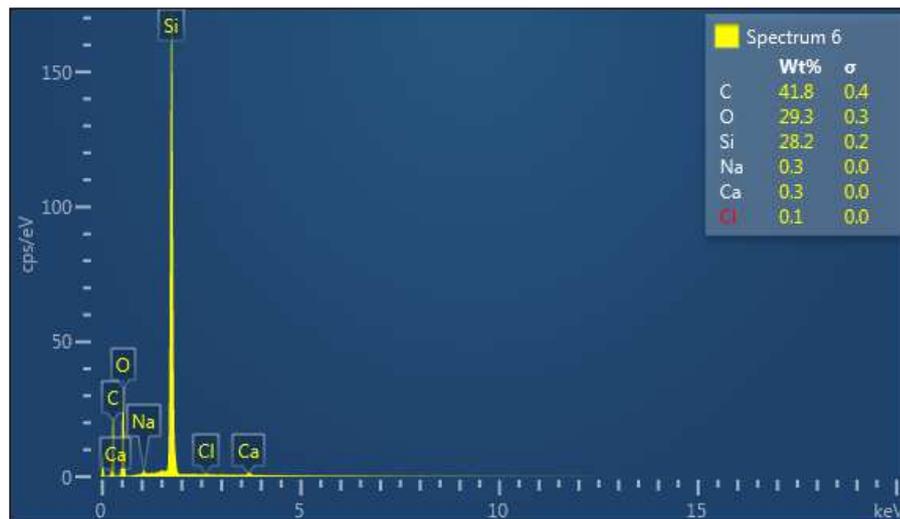


Figura 52: Elementos presentes no ponto localizado sobre o agregado.

A Figura 53 faz uma comparação entre os espectros dos dois pontos indicados e evidencia a presença maior de sílica no ponto localizado sobre o agregado, isentando assim, a presença de gel na fissura apresentada.

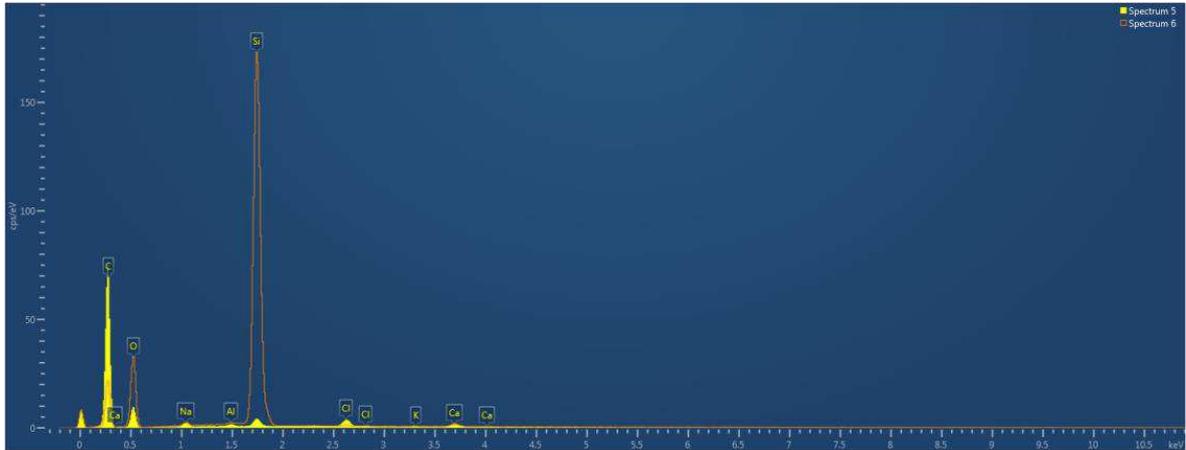


Figura 53: Gráfico comparativo entre os dois pontos indicados.

Ainda investigando a imagem da fissura apresentada, foi realizado um mapeamento da região (Figura 54). De acordo com Mehta e Monteiro (2008), se houvesse a presença de uma reação álcali-sílica haveria uma intensa presença de sílica, potássio, alumínio ou sódio. Este fato levou a investigação de uma possível reação álcali-carbonato que pudesse justificar a expansão ocorrida.

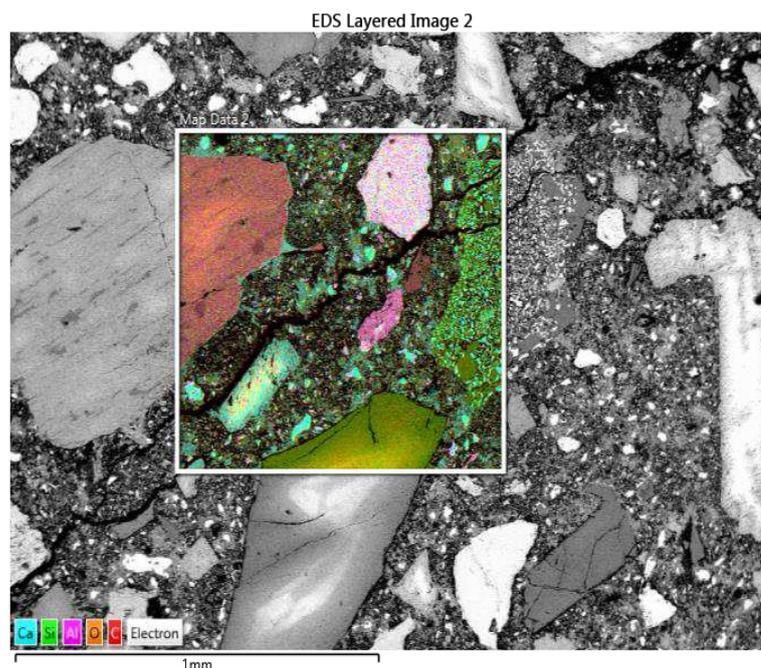


Figura 54: Mapeamento dos elementos existentes na região delimitada.

A Figura 55 ilustra a separação da imagem destacando a localização de cada elemento existente. Confirma-se a ausência de sílica, potássio e sódio na região da fissura.

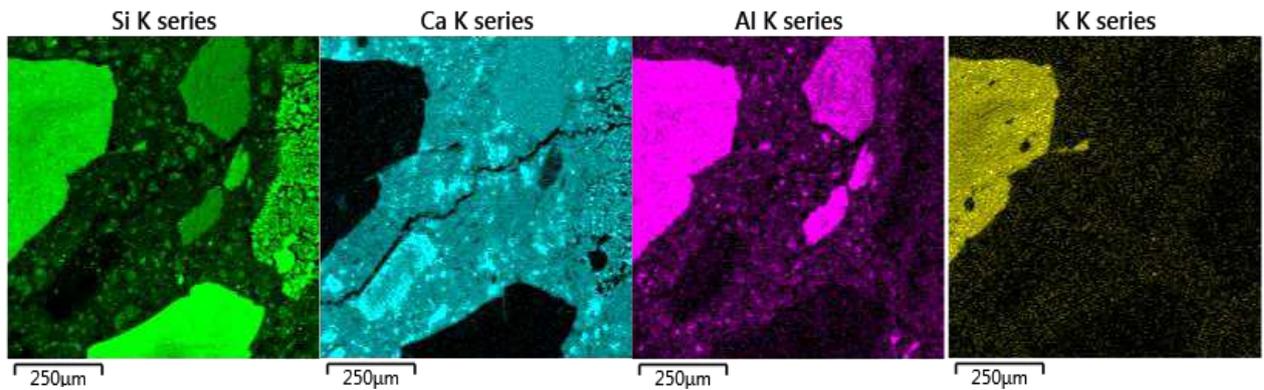


Figura 55: Mapeamento por EDS identificando os elementos presentes.

A Figura 56 ilustra outra região da amostra com a presença de fissura, nesta imagem, a fissura é identificada na pasta de cimento, bem como no próprio agregado.

A Figura 57 ilustra os percentuais dos elementos presentes na região delimitada. A imagem indica a presença mais intensa de sílica, porém confirmada com a Figura 58 que a sílica não está presente na fissura, apenas na pasta de cimento e em maior quantidade no agregado.

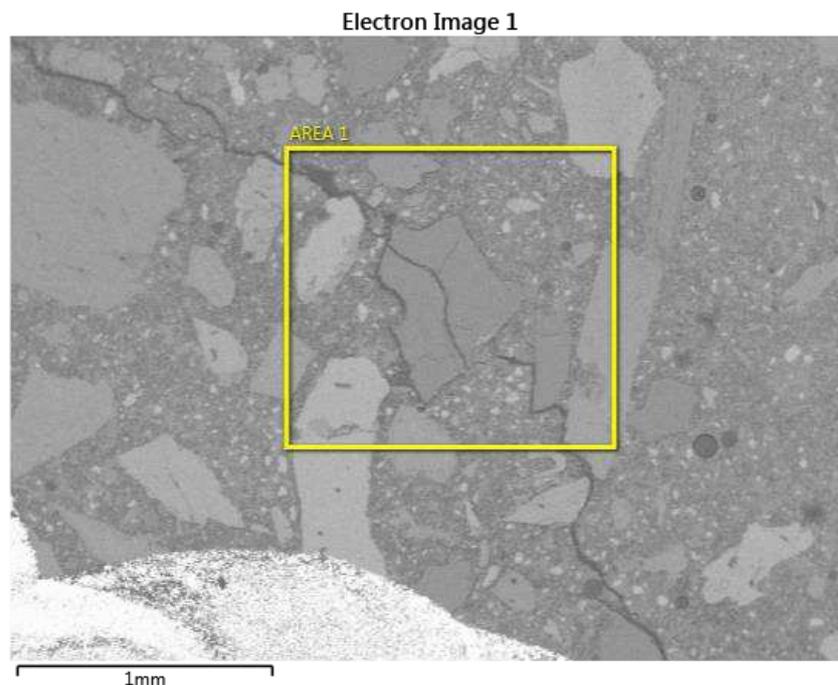


Figura 56: Presença de fissura tanto na pasta de cimento quanto no agregado

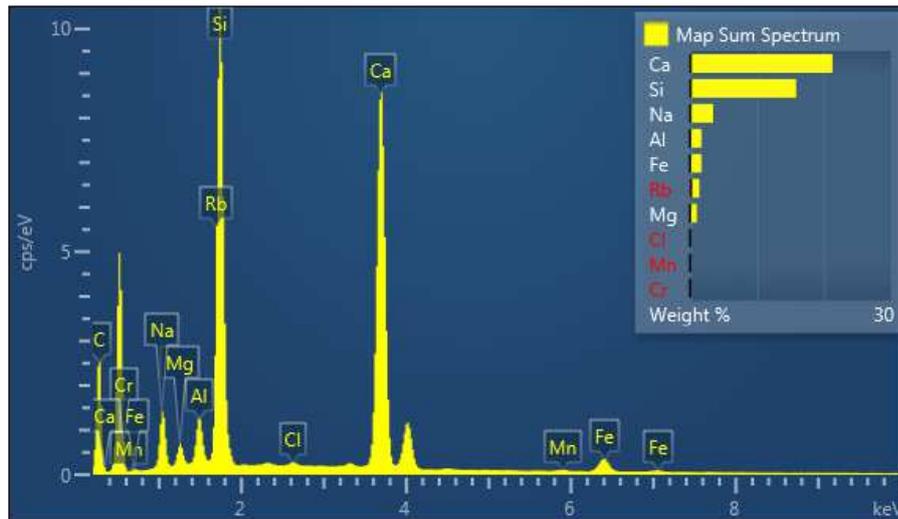


Figura 58: Elementos presentes na região da fissura (2017).

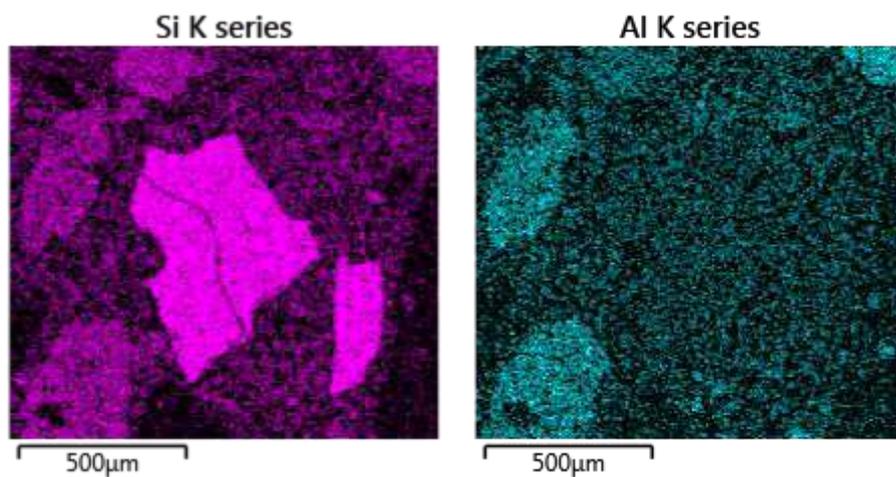


Figura 57: Mapeamento da sílica e do alumínio presentes na região.

A Figura 59 ilustra mais uma região da amostra com fissura, desta vez margeando o agregado, na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento.

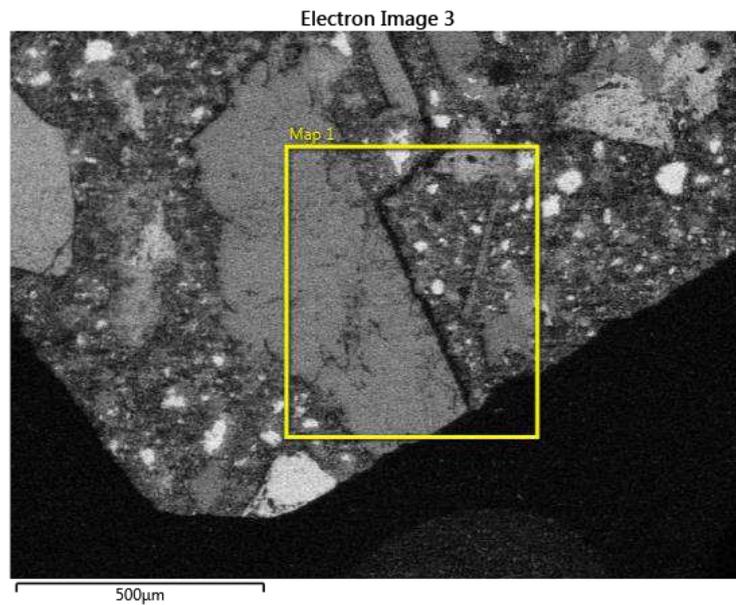


Figura 59: Presença de fissura na zona de transição.

A Figura 60 ilustra os percentuais dos elementos presentes na região delimitada. A imagem indica a presença mais intensa de sílica, com a confirmação da Figura 61 que a sílica não está presente na fissura, apenas na pasta de cimento e em maior quantidade no agregado. Além da sílica, a Figura 61 confirma a presença de carbono na fissura, confirmando mais uma vez a ausência de gel deletério na argamassa.

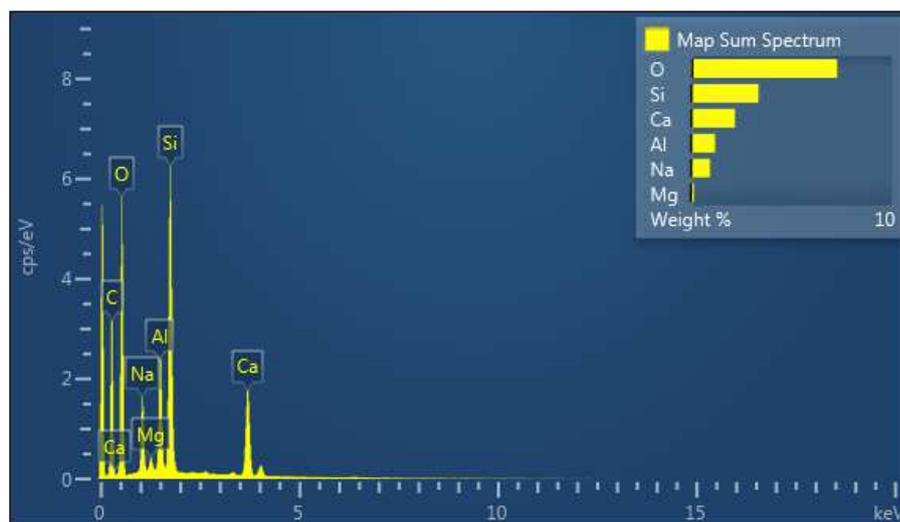


Figura 60: Elementos presentes na região da fissura.

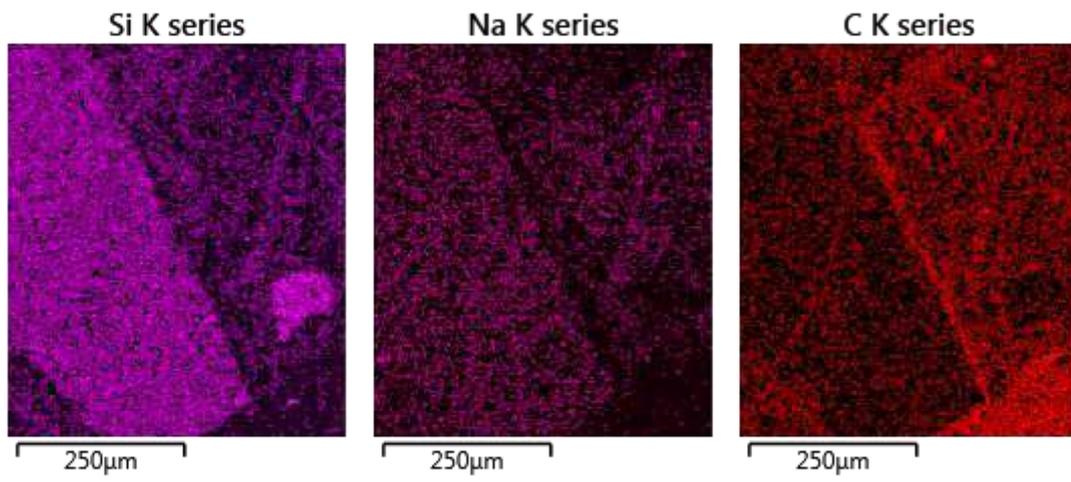


Figura 61: Mapeamento da sílica, sódio e do carbono presentes na região.

5 CONCLUSÃO

Após estudos com resíduo de Scheelita incorporados em argamassa para uso em construção civil foi possível concluir que:

- 1) Por meio da composição química, observou-se que o resíduo de Scheelita apresentou elevado teor de óxido de cálcio.
- 2) O resíduo de Scheelita apresentou as seguintes fases mineralógicas: Quartzo, calcita e feldspato.
- 3) A caracterização ambiental classificou o resíduo de Scheelita como não perigoso.
- 4) O resíduo de Scheelita não interfere diretamente na densidade da argamassa no estado fresco.
- 5) As imagens de MEV do resíduo Scheelita, quando comparadas com as imagens da areia normal indicam uma maior variedade no formato dos grãos.
- 6) O resíduo não apresentou atividade pozolânica.
- 7) Os ensaios nas argamassas no estado fresco confirmaram que o traço 1:2:9 apresentou melhor desempenho que o traço 1:2:8 e mais econômico que o traço 1:2:10.
- 8) As argamassas com resíduo de Scheelita tem em média maior valor de resistência de aderência à tração do que as de referências.
- 9) Os ensaios de durabilidade das argamassas incorporadas com resíduos de Scheelita por meio do ciclo de molhagem evidenciaram que não houve variação do desempenho mecânico da argamassa mesmo após a submissão de 50 dias de ciclo, com baixa perda de massa inferior a 1%.
- 10) Com relação a investigação da suscetibilidade do resíduo à reação álcali-agregado, os resultados evidenciaram que não houve reação álcali-sílica nas argamassas incorporadas com resíduo de Scheelita, porém com indícios de que uma reação álcali-carbonato tenha ocorrido, justificando o processo de expansão identificado.
- 11) Nas imagens de MEV obtidas por elétrons secundários da argamassa foram identificados os vazios (poros) sem a presença de géis deletérios.
- 12) Nas imagens de MEV obtidas por elétrons retroespehados, identificaram-se algumas fissuras em diferentes pontos das amostras.

Com base nos objetivos específicos pode-se concluir que o resíduo de Scheelita é classificado como reativo com os álcalis presentes no cimento. Logo, para ser utilizado em argamassas em substituição ao agregado convencional deve-se escolher um cimento Portland que iniba essas reações. Diante dessas perspectivas, espera-se que essa pesquisa tenha em muito contribuído para o avanço científico, como também uma elevada importância com a preservação ao meio ambiente.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento desta pesquisa possibilitou a imersão no tema da análise da microestrutura de concretos e argamassas e, conseqüentemente despertou o interesse em investigar outras técnicas de caracterização, bem como a produção de outros materiais com o resíduo da Scheelita, a saber:

- Produzir, após um processo de moagem, uma granulometria do resíduo mais fino que possa ser incorporado como agregado na produção de blocos prensados;
- Realizar estudos para incorporação do resíduo na produção de microconcreto;
- Investigar a alteração da microestrutura da argamassa com o auxílio da microtomografia;
- Avaliar o resíduo fino produzido pela mineradora como substituto parcial do cimento na argamassa;

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AKSOGAN, O., BINICI, H., ORTLEK, E. Durability of concrete made by partial replacement of fine aggregate by colemanite and barite and cement by ash of corn stalk, wheat straw and sunflower stalk ashes. **Construction and Building Materials**, 253-263, 2016.

ALMEIDA, AB.D. SOUZA, M. M., MENDES, L. B., FARIAS, D. S. U., LIMA, T. C., NOBREGA, L. F. P. 22º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, 2016.

ALVES, B.S., PEREIRA, D. D., IZÍDIO JÚNIOR, L. R., GURGEL, M. T. Análise comparativa do agregado miúdo com o rejeito da scheelita para aplicação na construção civil. 22º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, RN, 2016.

ARGILA EXPANDIDA. 2018. <Disponível em <http://argex.pt/produto.html>>.

ASSIS, R. B., MACHADO, T.G., MONTEIRO, F. M., CARLOS, E. M., SOUSA, R. F., OLIVEIRA, W. G., JESUS, A. P. Produção de placas solo-cimento com adição de resíduo de Scheelita. 22º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, RN, 2016.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. São Paulo: ABCP, 2002.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR NM 26/2009 – Agregados – amostragem**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR NM 27/2001 – Redução da amostra de campo para ensaio de laboratório**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 45 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 7175 – Cal hidratada para argamassas – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 7211 – Agregados para concreto: Especificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 7214 – Areia normal para ensaio de cimento: Especificações.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 10004 - Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 10006 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 12653 - Materiais pozolânicos — Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 13278 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 13279 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 13280 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 13281 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 15258 - Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 15.575-1: Edificações Habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos Gerais.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 15577-4 - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 15577-3 – Agregados: reatividade álcali-agregado. Parte 3: Análise petrográfica para verificação de**

potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 16697 – Cimento Portland: Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR ISO 9001 – Sistema de Gestão de Qualidade: Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR ISSO 3310 – Peneiras de ensaio: requisitos técnicos e verificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ATTARD`S MINERALS. 2016. <Disponível em <https://attminerals.com>>.

BARROS, S. V., MARCIANO, J. A., FERREIRA, H. C., MENEZES, R. R., NEVES, G. Addition of quartzite residues on mortars: Analysis of the alkali aggregate reaction and the mechanical behavior. **Construction and Building Materials**, pp. 344-351, 2016.

CARASEK, H. **Argamassas.** Em *Materiais de Construção Civil*. São Paulo: IBRACON, 2007.

CARASEK, H. Argamassas. In: Isaia, G.C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2010. p. 892-944

CARLOS, E. M. **Efeito da adição do resíduo de Scheelita no comportamento termo-mecânico e reológico de argamassas para engobes cerâmicos.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, 2018.

CHEAH, C. B., RAMLI, M. Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement. **Construction and Building Materials**, pp. 320-329, 2012.

COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO. *Sistemas a base de cimento.* 2018. <Disponível em <http://comunidadedaconstrucao.com.br>>.

CONSTRUIR. 2016. <Disponível em <http://blog.construir.arq.br/tipos-de-brita-e-funcao>>.

COSTA FILHO F. DAS C. **Estudo de Viabilidade Técnica do uso de resíduo oriundo do beneficiamento da scheelita na composição de concretos asfálticos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, 2017.

DANA, J. D. **Manual da Mineralogia.** Rio de Janeiro, RJ: Livros Técnicos S/A, 1970.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Anuário Mineral.** ISSN 0100-9303, Brasília, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Anuário Mineral do Rio Grande do Norte**. Brasília, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Sumário Mineral**. ISSN 0101-2053, v. 36, Brasília, 2018.

DJOBBO, J. N., ELIMBI, A., TCHAKOUTÉ, H. K., KUMAR, S. (2016). Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. **Construction and Building Materials**, 606-614, 2016.

EVANGELISTA, L., GUEDES, M., DE BRITO, J., FERRO, A. C., PEREIRA, M. F. Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. **Construction and Building Materials**, pp. 178-188, 2015.

FERNANDES, B. R. **Aproveitamento dos Finos de Scheelita Utilizando Concentração Centrifuga e Lixiviação Ácida**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Recife.

GALVÃO, A. C. P., SANTANA, J. S., MENDES, J. U. L., FARIAS, A. C. M., SANTANA, J. S., BARRETO, F.M. Caracterização de compósitos de espuma rígida de poliuretano de mamona com partículas de rejeito da Scheelita e do porcelanato. 22º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, RN, 2016.

GOMES NETO, D. P., BARRETO, L. S. Uma discussão sobre a reação álcali-agregado (RAA), seu mecanismo e os fatores que a influenciam. IX CINPAR - Congresso Internacional sobre Patologia y Recuperación de Estructuras. João Pessoa, Paraíba, 2013.

HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P.; KENNEDY, C. Environment: Waste production must peak this century. **Nature**, v. 502, 2013.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, São Paulo, 2008.

MODRO, N.L.R., OLIVEIRA, A.P.N.I. Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET. **Matéria**, v.4, n.1, 2009.

MOURA, W. A., LEITE, M. B., BASTOS, A. J. O. Avaliação do uso de resíduo de serragem de pedra Cariri (RSPC) para produção de concretos convencionais. **Ambiente Construído**. v. 13, n.1, p. 7-24. Porto Alegre, 2013.

NERAMITKORNBURI, A., HORPIBULSK, S., SHEN, S. L., CHINKULKIJNIWAT, A. Durability against wetting-drying cycles of sustainable lightweight cellular cemented construction material comprising clay and fly ash wastes. **Construction and Building Materials**, 41-49, 2015.

NEVES, G. A., MENEZES, R. R., FERREIRA, H. C. O Estado da Arte Sobre o Uso de Resíduos como Matérias-primas Cerâmicas Alternativas. **Revista Brasileira de engenharia Agrícola e Ambiental**, 6, 303-313, 2002.

PAIVA, E. H. G. **Avaliação do concreto de cimento Portland com Resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Natal, 2013.

PEREIRA, F. M., NEVES, P. C. P., LENZ, D. M. VERNEY, J. C. K. Avaliação da reatividade potencial de rochas utilizadas como agregados na construção civil no estado do Rio Grande do Sul. *Matéria (Rio J.)*, 23, 2018.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2010.

POSSAN, E., DEMOLINER, C. A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: uma abordagem geral. **Revista Técnico Científica do CREA-PR**, 2016.

RECENA, F. A. **Conhecendo Argamassa**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2012.

SCHACKOW, A., STRINGARI, D., SENFF, L., CORREIA, S. L., SEGADÃES, A. M. Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. **Cement and Concrete Composites**, pp. 82-89, 2015.

SILVA, Y. E., MACHADO, T. G., MOREIRA, D. M. C., ASSIS, R. B., MEDEIROS, P. N. Incorporação de resíduo de Scheelita em massa cerâmica para produção de blocos cerâmicos. 70ª Reunião Anual da SBPC. Maceió, Alagoas, 2018.

TOBON, J. I., PAYÁ, J., RESTREPO, O. J. Study of durability of Portland cement mortars blended with silica nanoparticles. **Construction Building Materials**, pp. 92-97, 2015.

TRAFLOUI, A., ESCADEILLAS, G., VIDAL, T. Durability of the ultra-high performances of concrete containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, pp. 980-987, 2016.

VIEIRA, G. L., DAL MOLIN, D. C. Viabilidade Técnica da Utilização de Concretos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição. **Ambiente Construído**, 4, 47-63, 2014.

ZAHEDI, M., RAMEZANIANPOUR, A. A., RAMEZANIANPOUR, A. M. Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration. **Construction and Building Materials**, pp. 354-361, 2015.