



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Emanuel Henrique Gomes Paiva**

**AVALIAÇÃO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND COM  
RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE SCHEELITA EM SUBSTITUIÇÃO AO  
AGREGADO MIÚDO**

**Natal  
2013**

**Emanuel Henrique Gomes Paiva**

**AVALIAÇÃO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND COM  
RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE SCHEELITA EM SUBSTITUIÇÃO AO  
AGREGADO MIÚDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza

**Natal**

**2013**

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede  
Catalogação da Publicação na Fonte

Paiva, Emanuel Henrique Gomes.

Avaliação do concreto de cimento Portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo. / Emanuel Henrique Gomes Paiva. – Natal, RN, 2013.

102 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alysso Brilhante Faheina de Souza.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Concreto - Dissertação. 2. Resíduo - Dissertação. 3. Scheelita - Dissertação. 4. Sustentabilidade – Dissertação. I. Souza, Paulo Alysso Brilhante Faheina de. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624.012.45

EMANUEL HENRIQUE GOMES PAIVA

**AVALIAÇÃO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND COM  
RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE SCHEELITA EM SUBSTITUIÇÃO AO  
AGREGADO MIÚDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza  
Orientador

---

Profa. Dra. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá  
Examinadora interna (UFRN)

---

Profa. Dra. Sandra Maria de Lima  
Examinadora externa (IFRN)

Natal, 23 de agosto de 2013.

# **AVALIAÇÃO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND COM RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE SCHEELITA EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO**

**Emanuel Henrique Gomes Paiva**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza

## **Resumo**

A partir da década de 70, com a publicação do *Manifesto Ambiental* pela Conferência das Nações Unidas, realizada em Estocolmo, na Suécia (1972), defender e melhorar o meio ambiente passou a fazer parte do nosso cotidiano. Dessa forma, várias pesquisas ligadas a sustentabilidade surgiram em diversos segmentos com o objetivo do aproveitamento de resíduos. Alguns exemplos de resíduos incorporados ao concreto de cimento Portland são: cinza da casca de arroz, cinza do bagaço de cana-de-açúcar, pó-de-pedra, microsíllica, borracha de pneu, entre outros. Este estudo utilizou o resíduo da produção da indústria da mineração de Scheelita, com o objetivo de avaliar a incorporação do resíduo à composição do concreto de cimento Portland, em substituição da areia natural. As porcentagens incorporadas do resíduo foram de 0% até 100%, com variação de 10%, sendo produzidos 11 traços de concreto na proporção 1:2:3:0,60, em massa. Foram avaliadas as seguintes características do concreto: trabalhabilidade, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água, índice de vazios e massa específica, tendo como base as normas da ABNT, através de ensaios realizados no Laboratório de Construção Civil da UFRN. O traço com a incorporação de 60% de resíduo de Scheelita foi o que obteve

melhor desempenho. Portanto, o uso do resíduo da produção de Scheelita é viável, devido aos parâmetros de durabilidade (absorção de água e índice de vazios), da sustentabilidade, e dos bons resultados das resistências do concreto.

**Palavras-chave:** Concreto. Resíduo. Scheelita. Sustentabilidade.

# EVALUATION OF PORTLAND CEMENT CONCRETE WITH WASTE PRODUCTION OF SCHEELITE IN REPLACEMENT THE FINE AGGREGATE

Emanuel Henrique Gomes Paiva

Adviser: Prof. Dr. Paulo Alysso Brilhante Faheina de Souza

## ABSTRACT

From the 70's, with the publication of the *Manifesto for Environment* UN Conference, held in Stockholm, in Sweden (1972), defend and improve the environment became part of our daily lives. Thus, several studies have emerged in several segments in order to reuse the waste. Some examples of waste incorporated in portland cement concrete are: rice husk ash, bagasse ash of cane sugar, powder-stone, microsilica, tire rubber, among others. This research used the residue of the mining industry Scheelite, to evaluate the incorporation of the residue composition of Portland cement concrete, replacing the natural sand. The percentage of residue were incorporated from 0% to 100%, with a variation of 10%, 11 being produced concrete mix in the ratio 1:2:3:0.60, by mass. We evaluated the following characteristics of concrete: slump test, compressive strength, tensile strength by diametral compression, water absorption, porosity and density, based on the ABNT, through tests performed in the Laboratory of Civil Construction, UFRN. The trace with the addition of 60% scheelite residue was obtained which better performance. Therefore, the use of the waste from the production of Scheelite is feasible due to the durability parameters (water absorption and porosity), sustainability, and the good results of the resistance of the concrete.

**Keywords:** Concrete. Residue. Scheelite. Sustainability.

## **Agradecimentos**

Ao meu bom Deus!

Aos meus pais, que sempre estiveram presentes na minha vida, o meu eterno agradecimento!

À minha esposa (arquiteta, amiga e companheira), Danielle Sena, pelos momentos de apoio, compreensão e dedicação à minha vida.

Ao meu filho querido, Henrique Paiva, responsável pelos sentimentos mais indescritíveis que senti em minha vida.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte, instituição responsável pelas minhas formações e especializações.

Ao Diretor Geral do IFRN – Campus de São Gonçalo do Amarante/RN, Prof. Carlos Guedes Alcoforado; e o Diretor de Infraestrutura e Engenharia do IFRN, Prof. Josué Martins da Silva, os quais me deram apoio e atenção através da amizade e companheirismo no exercício de minha função de Engenheiro Civil.

Ao meu orientador, Prof. Paulo Alysso, pelo apoio e atenção através das orientações que me foram dadas.

Aos funcionários do laboratório de Materiais de Construção da UFRN, Sr. Francisco Braz e Sandro Ricardo, pela ajuda extraordinária que me foi dada nos momentos em que mais necessitei.

A todos os professores do PEC – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, que me ajudaram através das disciplinas ministradas no mestrado.

À Rafaella Xavier, pela atenção e simpatia ao longo do Mestrado.

A todos que me ajudaram, de maneira direta ou indireta. Muito obrigado!

## Sumário

LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE ABREVIATURAS	
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO .....	15
1.1 ESTRUTURA DA PESQUISA .....	18
CAPÍTULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	18
2.1 ESGOTAMENTO DOS RECURSOS NATURAIS .....	18
2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	20
2.3 GESTÃO DE RESÍDUOS .....	23
2.4 DIFERENÇA ENTRE RESÍDUO E REJEITO.....	25
2.5 ESTADO DA ARTE .....	25
2.5.1 Cinza da Casca de Arroz (CCA) .....	26
2.5.2 O uso da borracha de pneu .....	27
2.5.3 Resíduo do polimento do porcelanato .....	28
2.5.4 Politereftalato de estireno – PET .....	28
2.5.5 Resíduo de cerâmica vermelha .....	29
2.5.6 Resíduo do beneficiamento da ágata .....	30
2.5.7 Resíduo da serragem da pedra Cariri.....	30
2.5.8 Resíduo de pó de brita.....	30
2.5.9 Pó de vidro.....	30
2.5.10 Metacaulim e sílica ativa .....	32
2.5.11 Pó de mármore .....	32
2.5.12 Scheelita na matriz cerâmica .....	33
2.6 BREVE HISTÓRIO SOBRE A MINERAÇÃO NO NORDESTE BRASILEIRO .	33
2.7 A INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO DA SCHEELITA NO RN .....	35
2.7.1 Etapas da produção da Scheelita .....	38
2.8 A ROCHA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO .....	43
2.9 PROPRIEDADES DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND.....	45
2.9.1 Propriedades do concreto fresco .....	45
2.91.1 Consistência (Trabalhabilidade) .....	45
2.9.2. Propriedades do concreto endurecido .....	46

2.9.2.1	<i>Massa específica</i> .....	46
2.9.2.2	<i>Resistência à compressão axial</i> .....	47
2.9.2.3	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i> .....	48
2.9.2.4	<i>Absorção e índice de vazios</i> .....	48
2.10	TÉCNICAS EXPERIMENTAIS PARA O ESTUDO DA MICROESTRUTURA	49
2.10.1	Espectroscopia por fluorescência de raios X .....	49
2.10.2	Difratometria de raios X – DRX.....	50
2.10.3	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV .....	50
CAPÍTULO III:	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	52
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	52
3.1.1	Escolha do traço .....	53
3.1.2	Cálculo dos quantitativos .....	54
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	55
3.2.1	Cimento .....	55
3.2.1.1	<i>Ensaio de finura</i> .....	56
3.2.1.2	<i>Ensaio de início de pega</i> .....	56
3.2.1.3	<i>Ensaio de expansibilidade</i> .....	56
3.2.1.4	<i>Ensaio de resistência à compressão axial</i> .....	57
3.2.2	Areia .....	57
3.2.2.1	<i>Granulometria</i> .....	57
3.2.2.2	<i>Massa específica real e unitária</i> .....	58
3.2.2.3	<i>FRX e DRX da areia</i> .....	59
3.2.2.4	<i>MEV das partículas da areia</i> .....	59
3.2.3	Brita .....	60
3.2.3.1	<i>Granulometria</i> .....	60
3.2.3.2	<i>Massa específica real e unitária</i> .....	60
3.2.4	Resíduo da Produção de Scheelita (RPS).....	61
3.2.4.1	<i>Granulometria</i> .....	61
3.2.4.2	<i>Massa específica real e unitária</i> .....	61
3.2.4.3	<i>FRX e DRX do resíduo</i> .....	61
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO .....	62
3.3.1	Ensaio no concreto .....	62
3.3.1.1	<i>Abatimento do tronco de cone</i> .....	62
3.3.1.2	<i>Resistência à compressão axial</i> .....	63

3.3.1.3 Resistência à tração por compressão diametral.....	63
3.3.1.4 Absorção e índice de vazios.....	65
3.3.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.....	66
CAPÍTULO IV: RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
4.1 CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS.....	69
4.1.1 Cimento.....	69
4.1.1.1 Ensaio de início de pega.....	69
4.1.1.2 Ensaio de expansibilidade.....	70
4.1.1.3 Ensaio de finura.....	70
4.1.1.4 Ensaio de resistência à compressão axial.....	70
4.1.2 Areia.....	70
4.1.2.1 Composição granulométrica.....	70
4.1.2.2 Massa específica real e massa unitária.....	72
4.1.2.3 FRX do agregado miúdo.....	72
4.1.2.4 DRX do agregado miúdo.....	73
4.1.2.5 Análise da microestrutura da partícula do agregado miúdo.....	73
4.1.3 Brita.....	74
4.1.3.1 Composição granulométrica.....	74
4.1.3.2 Massa específica real e massa unitária.....	75
4.1.4 Resíduo da produção de Scheelita.....	75
4.1.4.1 Composição Granulométrica.....	75
4.1.4.2 Massa específica real e massa unitária.....	77
4.1.4.3 FRX do resíduo.....	77
4.1.4.4 DRX do resíduo.....	78
4.1.4.5 Análise da microestrutura da partícula do resíduo.....	79
4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO.....	80
4.2.1 Ensaio da consistência.....	80
4.2.2 Ensaio da resistência à compressão axial.....	81
4.2.3 Ensaio da resistência à tração por compressão diametral.....	86
4.2.4 Ensaio de índice de vazios.....	87
4.2.5 Ensaio de absorção.....	89
4.2.6 Ensaio de massa específica.....	90
4.2.7 Análise da microestrutura do concreto.....	91

4.2.8 Análise de custo do m <sup>3</sup> de concreto com resíduo .....	92
CAPÍTULO V: CONCLUSÕES .....	96
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	97
REFERÊNCIAS.....	98

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Dunas de rejeito da Mina Brejuí. ....	17
Figura 2.1 – Mapa do estado do Rio Grande do Norte – Brasil, com destaque para o município de Currais Novos. ....	36
Figura 2.2 – Fragmentos da rocha. ....	38
Figura 2.3 – Transporte dos fragmentos. ....	38
Figura 2.4 – Triagem dos pedregulhos.....	38
Figura 2.5 – Britador.....	39
Figura 2.6 – Pedras após o britador. ....	39
Figura 2.7 – Início das esteiras e rebitador. ....	39
Figura 2.8 – Depósito após britadores. ....	40
Figura 2.9 – Saída do depósito. ....	40
Figura 2.10 – Material após estocagem. ....	40
Figura 2.11 – Sequência de esteiras.....	40
Figura 2.12 – Material caindo em um depósito e sendo hidratado. ....	40
Figura 2.13 – Recipiente para a hidratação do material.....	40
Figura 2.14 – Depósito com peneiras.....	41
Figura 2.15 – Depósito para distribuição do material. ....	41
Figura 2.16 – Mesas vibratórias. ....	41
Figura 2.17 – Mesas vibratórias. ....	41
Figura 2.18 – Detalhe da Scheelita nas mesas vibratórias. ....	42
Figura 2.19 – Material para reprocessamento.....	42
Figura 2.20 – Saída do resíduo .....	42
Figura 2.21 – Resíduo da extração da Scheelita.....	42
Figura 2.22 – Dunas de resíduos da extração da Scheelita.....	43
Figura 2.23 – Dunas de resíduos da extração da Scheelita.....	43
Figura 3.1 – Porta amostra com partículas de areia e Scheelita .....	60
Figura 3.2 – Medida do abatimento, dimensões em mm.....	63
Figura 3.3 – Disposição do cp para ensaio de resist. à tração por comp. diametral. ....	64
Figura 3.4 – Corte dos CP's .....	66
Figura 3.5 – Corte dos CP's. ....	66
Figura 3.6 – “Bolachas” dos CP's.....	67

Figura 3.7 – Amostras dos CP's.....	67
Figura 3.8 – Nitrogênio líquido. ....	67
Figura 3.9 – Amostras de concreto congelado.....	67
Figura 3.10 – Fratura das amostras de concreto.....	68
Figura 3.11 – Amostra de concreto metalizada.....	68
Figura 4.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo. ....	72
Figura 4.2 – Difratoograma das fases identificadas na amostra da areia.....	73
Figura 4.3 – Imagem das partículas da areia (50x).....	73
Figura 4.4 – Imagem das partículas da areia (100x).....	73
Figura 4.5 – Imagem das partículas da areia (200x).....	74
Figura 4.6 – Imagem das partículas da areia (400x).....	74
Figura 4.7 – Curva granulométrica do agregado graúdo.....	75
Figura 4.8 – Curva granulométrica do resíduo da produção de Scheelita.....	76
Figura 4.9 – Difratoograma das fases identificadas na amostra do resíduo.....	79
Figura 4.10 – Imagem das partículas do resíduo (50x).....	79
Figura 4.11 – Imagem das partículas do resíduo (100x).....	79
Figura 4.12 – Imagem das partículas do resíduo (150x).....	80
Figura 4.13 – Imagem das partículas do resíduo (400x).....	80
Figura 4.14 – Resultado do ensaio de consistência.....	81
Figura 4.15 – Médias das resistências à compressão axial aos 07 dias.....	83
Figura 4.16 – Médias das resistências à compressão axial aos 28 dias.....	84
Figura 4.17 – Médias das resistências à compressão axial aos 91 dias.....	86
Figura 4.18 – Médias das resistências à tração por compressão diametral.....	87
Figura 4.19 – Médias dos resultados dos índices de vazios.....	88
Figura 4.20 – Médias das absorções por água cada traço.....	89
Figura 4.21 – Médias das massas específicas dos concretos.....	91
Figura 4.22 – Zona de transição entre agregado e argamassa do TP.....	91
Figura 4.23 – Imagem da matriz do traço TP.....	91
Figura 4.24 – Zona de transição entre agregado e argamassa do TR20%.....	92
Figura 4.25 – Imagem da matriz do traço TR20%.....	92
Figura 4.26 – Zona de transição entre agregado e argamassa do TR80%.....	92
Figura 4.27 – Imagem da matriz do traço TR80%.....	92

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1</b> – Valores de abatimento em função do tipo de obra.....	46
<b>Tabela 3.1</b> – Nomenclatura dos traços do concreto com resíduo da produção de Scheelita.....	53
<b>Tabela 3.2</b> – Número de amostras de corpos de prova. ....	54
<b>Tabela 3.3</b> – Representação dos traços e quantidade de materiais. ....	55
<b>Tabela 4.1</b> – Resultados do ensaio de início de pega do cimento Portland.....	69
<b>Tabela 4.2</b> – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial do cimento Portland.....	70
<b>Tabela 4.3</b> – Composição granulométrica do agregado miúdo.....	71
<b>Tabela 4.4</b> – Massa específica real e massa unitária da areia. ....	72
<b>Tabela 4.5</b> – Análise química semiquantitativa da areia. ....	74
<b>Tabela 4.6</b> – Composição granulométrica do agregado graúdo. ....	74
<b>Tabela 4.7</b> – Massa específica real e massa unitária da brita. ....	75
<b>Tabela 4.8</b> – Composição granulométrica do resíduo da Scheelita. ....	76
<b>Tabela 4.9</b> – Massa específica real e massa unitária do resíduo da Scheelita.....	77
<b>Tabela 4.10</b> – Análise química semiquantitativa do Resíduo.....	78
<b>Tabela 4.11</b> – Resultados do ensaio da resistência à compressão axial aos 07d. ...	82
<b>Tabela 4.12</b> – Resultados do ensaio da resistência à compressão axial aos 28d. ...	83
<b>Tabela 4.13</b> – Resultados do ensaio da resistência à compressão axial aos 91d. ...	85
<b>Tabela 4.14</b> – Resultados do ensaio da resistência à tração por compressão axial. ...	86
<b>Tabela 4.15</b> – Resultados do ensaio de índice de vazios. ....	88
<b>Tabela 4.16</b> – Resultados do ensaio de absorção por água.....	89
<b>Tabela 4.17</b> – Resultados do ensaio de massa específica, em Kg/m <sup>3</sup> .....	90
<b>Tabela 4.18</b> – Valores dos insumos para o concreto de cimento Portland .....	93
<b>Tabela 4.19</b> – Quantidade de materiais, em massa, para produção de 1m <sup>3</sup> de concreto para o traço padrão .....	94
<b>Tabela 4.20</b> – Quantidade de agregados, em volume, para produção de 1m <sup>3</sup> de concreto para o traço padrão .....	94
<b>Tabela 4.21</b> – Valores dos insumos para confecção de 1m <sup>3</sup> de concreto para o traço padrão .....	94
<b>Tabela 4.22</b> – Quantidade de materiais, em massa, para produção de 1m <sup>3</sup> de concreto para o traço TR60%.....	94

**Tabela 4.23** – Quantidade de materiais, em volume, para produção de 1m<sup>3</sup> de concreto para o traço TR60%.....95

**Tabela 4.24** – Valores dos insumos para confecção de 1m<sup>3</sup> de concreto para o traço TR60% .....95

## Lista de Abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
CCA – Cinza da Casca de Arroz  
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente  
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais  
CP's – Corpos de prova  
CTGAS-ER – Centro de Tecnologia do Gás e Energia Renováveis  
DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral  
EUA – Estados Unidos da América  
FRX – Fluorescência de Raios X  
IFRN – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
LPMR – Laboratório de Processamento Mineral e de Resíduos  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura  
MMA – Ministério do Meio Ambiente  
NBR – Norma Brasileira  
OMC – Organização Mundial do Comércio  
ONG – Organização Não Governamental  
ONU – Organização das Nações Unidas  
PET – Politereftalato de Estireno  
PNRS – Plano Nacional de Resíduos Sólidos  
RCA – Resistência à Compressão Axial  
RCD – Resíduo de Construção e Demolição  
RMAI – Revista Meio Ambiente Industrial  
RPP – Resíduo do Polimento do Porcelanato  
RPS – Resíduo da Produção de Scheelita  
RS – Resistente a Sulfatos  
RTCD – Resistência à Tração por Compressão Diametral  
SSS – Saturada com Superfície Seca  
TP – Traço Padrão  
TRX% – Traço com X% de Resíduo de Scheelita  
UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
WWF – *World Wildlife Fund*

## CAPÍTULO I

# INTRODUÇÃO

Problemas ambientais são hoje parte de nossas discussões diárias: o aquecimento global, a poluição do ar e das águas, que afetam a saúde e a qualidade de vida de populações, mesmo em zonas rurais. Desde o fim do século XX, as questões ambientais são cada vez mais um fator dominante em praticamente todas as atividades diárias.

Dentre os problemas ambientais, encontram-se o grande consumo de recursos naturais pela indústria da construção civil e o descarte inadequado de resíduos no meio ambiente. John (2000) estimou que a indústria da construção civil, seja responsável por 20% a 50% do consumo dos recursos naturais extraídos do planeta. Em relação ao descarte dos resíduos, pesquisas surgiram com o objetivo investigar a utilização de diferentes resíduos como matéria-prima para a construção civil, como, por exemplo, a incorporação de resíduos à composição do concreto de cimento Portland.

Existem muitas definições para o desenvolvimento sustentável. Em comum, todas elas apontam para o fato de que o desenvolvimento promovido pela humanidade nos últimos 250 anos, que permitiu enormes ganhos na qualidade e na expectativa de vida para os seres humanos, vem alterando significativamente o equilíbrio do planeta e ameaçando a sobrevivência da espécie (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Este trabalho, pioneiro no estudo da incorporação da Scheelita ao concreto de cimento Portland, contribui para o desenvolvimento sustentável da indústria da mineração da Scheelita, visto que a estocagem dos resíduos é inadequada no meio ambiente, sendo um problema para fauna e flora.

Por conseguinte, o objetivo geral desse trabalho fundamenta-se em avaliar a substituição do agregado miúdo, a areia, pelo resíduo da produção de Scheelita visando dar um destino sustentável ao material e não criar novas dunas de estocagem de resíduos; como também, reduzir o consumo da areia natural,

principalmente em locais próximos as minas de extração da Scheelita. Os objetivos específicos propõem:

- Caracterizar macro e microestruturalmente o concreto com o novo agregado;
- Avaliar o comportamento plástico do concreto com o novo agregado, através do ensaio de consistência;
- Avaliar as resistências dos concretos produzidos com o novo agregado, através dos ensaios de compressão axial, para as idades de 07, 28 e 91 dias; e de tração por compressão diametral, para a idade de 28 dias;
- Avaliar as características de absorção, índice de vazios e massa específica para os concretos com o novo agregado.

Os concretos produzidos foram submetidos a ensaios no Laboratório de Construção Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, conforme as normas da ABNT. O traço utilizado foi 1:2:3:0,60, em massa; as porcentagens utilizadas de resíduo foram de 0% até 100%, com variação de 10%. Dessa forma, foram confeccionados 11 traços de concreto, sendo que a soma da areia com o resíduo totaliza 100% do agregado miúdo. Para todos os resultados dos ensaios foram calculados os desvios-padrão ( $\sigma$ ), que é a medida mais comum de dispersão estatística, com o intuito de observar a variação ou dispersão existente em relação à média.

Ensaio complementares foram realizados para caracterização do resíduo e/ou análise do concreto, tais como: a análise química do resíduo – realizada no Laboratório de Análises Químicas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN, em Nata/RN – Brasil; e a Micrografia Eletrônica de Varredura – MEV, realizada no Laboratório de Ensaio de Materiais do Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis – CTGAS-ER, localizado na cidade de Natal/RN – Brasil.

O resíduo foi coletado em uma das dunas de resíduo da extração de Scheelita, como pode ser observado na Figura 1.1, produzido pela mina Brejuí, no município de Currais Novos/RN – Brasil. Diariamente, são produzidos cerca de 50 m<sup>3</sup> de resíduos da extração da Scheelita, ou seja, cerca de 18.250 m<sup>3</sup>/ano (365 dias) de resíduos são produzidos.



Figura 1.1 – Dunas de rejeito da Mina Brejuí.

Fonte: acervo pessoal.

## 1.1 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, os quais apresentam os seguintes conteúdos:

No Capítulo I apresenta-se uma introdução ao tema escolhido, bem como os problemas ambientais da estocagem do resíduo da produção de Scheelita e também o consumo de recursos naturais pela indústria da construção civil.

No Capítulo II é composto de uma revisão da literatura apresentado o estado da arte sobre outros resíduos incorporados ao traço do concreto, o esgotamento dos recursos naturais, os impactos ambientais da construção civil, a gestão de resíduos e a indústria da mineração da Scheelita no Rio Grande do Norte.

No Capítulo III apresenta-se o procedimento experimental, onde é abordada a escolha do traço, cálculo dos quantitativos, caracterização dos materiais para confecção dos corpos de prova, a composição química e mineralógica do resíduo da produção de Scheelita, e o procedimento para a realização da microscopia eletrônica de varredura para o concreto para os traços 0%, 20% e 80% de resíduo.

No Capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos para os ensaios dos concretos.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas nessa pesquisa, além de sugestões para os trabalhos futuros em relação ao tema proposto nesse estudo.

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

## 2.1 ESGOTAMENTO DOS RECURSOS NATURAIS

Recurso natural é tudo o que a natureza nos oferece, como alimento, água, entre outros. Durante toda a história, o homem usou a natureza para sua sobrevivência, mas, principalmente depois do surgimento do capitalismo, há um grande excedente na sua utilização, sendo extraídos cada vez mais elementos da natureza. Geralmente esses recursos precisam ser trabalhados e transformados para a utilização (Fonte: [naturezacompartilhada.blogspot.com](http://naturezacompartilhada.blogspot.com)).

Os recursos naturais podem ser renováveis ou não. Os primeiros têm a capacidade de se renovar, mesmo depois do uso pelo ser humano, mas para isso deve ser respeitado o tempo necessário para a renovação desses elementos, tais como: florestas, água, solo, e energia solar; sendo os três primeiros considerados com potencial limitado. Já os recursos não renováveis são os que não possuem essa capacidade de renovação, tais como: alumínio, ferro, petróleo, entre muitos outros (Fonte: [naturezacompartilhada.blogspot.com](http://naturezacompartilhada.blogspot.com)).

A humanidade já consome mais recursos naturais do que o planeta é capaz de repor. O colapso é visível nas florestas, oceanos e rios. O ritmo atual de consumo é uma ameaça para a prosperidade futura da humanidade. A Organização Mundial do Comércio (OMC) afirma, em seu relatório *World Trade Report – Natural Resources*, que recursos naturais são “estoques de materiais existentes em ambiente natural que são escassos e economicamente úteis”, ou seja, se forem usados de forma excessiva, terminarão e teremos um problema enorme.

A exploração dos recursos naturais da Terra permite à humanidade atingir patamares de conforto cada vez maiores. Diante da abundância de riquezas proporcionada pela natureza, esses recursos sempre foram aproveitados como se fossem inesgotáveis. Essa visão foi reformulada. Hoje se sabe que a maioria dos recursos naturais dos quais o homem depende para manter seu padrão de vida pode desaparecer num prazo relativamente curto – e que é urgente evitar o

desperdício. Um relatório publicado pela ONG *World Wildlife Fund* dá a dimensão de como a exploração dos recursos da Terra saiu do controle. O estudo mostra que o atual padrão de consumo de recursos naturais pela humanidade supera em 30% a capacidade do planeta de recuperá-los, ou seja, a natureza não mais dá conta de repor tudo o que a humanidade tira dela. A conta da ONG foi feita da seguinte forma: primeiro, estimou-se a quantidade de terra, água e ar necessária para produzir os bens e os serviços utilizados pelas populações e para absorver o lixo que elas geram durante um ano; a seguir, esses valores foram transformados em hectares e o resultado dividido pelo número de habitantes do planeta. Chegou-se à conclusão de que cada habitante usa 2,7 hectares do planeta por ano. Nessa conta, o brasileiro utiliza 2,4 hectares. De acordo com a análise, para usar os recursos sem provocar danos irreversíveis à natureza, seria preciso que cada habitante utilizasse, no máximo, 2,1 hectares. Se o homem continuar a explorar a natureza sem dar tempo para que ela se restabeleça, em 2030 serão necessários recursos equivalentes a dois planetas Terra para atender ao padrão de consumo. Essa perspectiva, conclui o relatório, é uma ameaça à prosperidade futura da humanidade, com impacto no preço dos alimentos e da energia (Fonte: WWF).

Nos últimos 45 anos, a demanda pelos recursos naturais do planeta dobrou. Esse aumento se deve, principalmente, à elevação do padrão de vida das nações ricas e emergentes e ao crescimento demográfico dos países pobres. A população africana triplicou nas últimas quatro décadas. O crescimento econômico dos países em desenvolvimento, como a China e a Índia, vem aumentando em ritmo frenético a necessidade de matérias-primas para as indústrias. China e Estados Unidos, juntos, consomem quase metade das riquezas naturais da Terra. O impacto ambiental da China se explica pela demanda de sua imensa população e, nos Estados Unidos, pelo elevado nível de consumo. Nas contas da *World Wildlife Fund*, enquanto o chinês usa 2,1 hectares do planeta, o americano chega a utilizar 9,4 hectares. Se todos os habitantes do planeta tivessem o mesmo padrão de vida dos americanos, seriam necessárias quatro Terras e meia para suprir suas necessidades (Fonte: WWF).

Uma situação concreta, em relação à escassez de material na construção civil, aconteceu no estado do Rio Grande do Sul, mais precisamente na cidade de

Porto Alegre, capital daquele estado. O texto a seguir é do jornalista Fernando Diniz, extraído do *site* Terra<sup>1</sup>.

Obras de mobilidade para a Copa do Mundo de 2014 devem parar em Porto Alegre por falta de areia, segundo o sindicato que representa as indústrias de construção de estradas, pavimentação e obras de terraplanagem no Rio Grande do Sul. O setor alega que, por causa da proibição de extração de areia no rio Jacuí, não há material suficiente para dar continuidade à construção dos corredores rápidos de ônibus, em duas avenidas.

A extração de areia no rio foi suspensa em 24 de maio 2013 por determinação da Justiça Federal, após um pedido da Associação para Pesquisa de Técnicas Ambientais. O grupo denunciou a existência de um processo ilegal de extração do mineral, com danos ambientais às costas do rio e a destruição de mata ciliar. O Tribunal Regional Federal da 4ª Região (TRF4) manteve a decisão da primeira instância.

Segundo o diretor administrativo e financeiro do Sindicato da Indústria da Construção de Estradas, Pavimentação e Obras de Terraplanagem em geral no Estado do Rio Grande do Sul (Sicepot-RS), Nilto Scapin, além da escassez do produto, o preço do metro cúbico de areia dobrou em Porto Alegre, passou de cerca de R\$ 30,00 para R\$ 60,00. A falta do material afetará diretamente as obras dos corredores de ônibus nas avenidas Bento Gonçalves e Protásio Alves.

## **2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Até a década de 50, a natureza era considerada somente como um pano de fundo em qualquer discussão que abordasse a atividade humana e suas relações com o meio. Acreditava-se que a natureza existia para ser compreendida, explorada e catalogada, desde que utilizada em benefício da humanidade. Por outro lado, o avanço da tecnologia no pós-guerra dava sinais que não existiriam problemas que não pudessem ser resolvidos (FRAGA, 2006).

---

<sup>1</sup> Disponível em: <<http://noticias.terra.com.br/brasil/cidades/obras-da-copa-do-mundo-podem-parar-por-falta-de-areia-no-rs,65b260719961f310VgnVCM20000099cceb0aRCRD.html>>. Acesso em: 9 jul. 2013.

Os movimentos sociais que tiveram início nos anos 70 representaram um marco na humanidade e, em particular, para a formação de uma consciência preservacionista embasada, naquele momento, nos princípios do equilíbrio cósmico e da harmonia com a natureza. A partir daí, a palavra ecologia passa a ser um termo bastante utilizado (FRAGA, 2006).

A década de 80 foi um período de grande desenvolvimento econômico e técnico. O bem-estar material voltou a ser relevante, independentemente dos prejuízos à natureza que sua produção pudesse provocar (FRAGA, 2006).

Somente no final dos anos 80, entretanto, no processo preparatório da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano, a RIO 92, foi aprofundada a questão do Desenvolvimento Sustentável, que se contrapunha à tese-chave que imperara até então de que era possível desenvolver sem destruir o meio ambiente (FRAGA, 2006).

O documento resultante da conferência RIO 92, a “Agenda 21”, resultou em um despertar de uma consciência ambiental sobre a importância da conservação da natureza para o bem-estar e para a sobrevivência das espécies, inclusive a humana. O documento propunha que a sociedade assumisse uma atitude ética entre a conservação ambiental e o desenvolvimento. Denunciava a forma perdulária com que até então eram tratados os recursos naturais e propunha uma sociedade justa e economicamente responsável, produtora e produto do desenvolvimento sustentável (FRAGA, 2006).

Na indústria da construção civil, até então, não havia nenhuma preocupação quanto ao esgotamento dos recursos não renováveis utilizados ao longo de toda sua cadeia de produção e, muito menos, com os custos e prejuízos causados pelo desperdício de materiais e com o destino dado aos rejeitos produzidos nessa atividade. No Brasil, em particular, a falta de uma consciência ecológica na indústria da construção civil resultou em estragos ambientais irreparáveis, agravados pelo maciço processo de migração ocorrido na segunda metade do século passado, quando a relação existente de pessoas no campo e nas cidades, de 75% para 25%, foi invertida, ocasionando uma enorme demanda por novas habitações (FRAGA, 2006).

Nas discussões sobre a “Agenda 21”, nasceu um movimento denominado de “*Construção Sustentável*”, que visava o aumento das oportunidades ambientais para as gerações futuras e que consistia em uma estratégia ambiental com visão

holística. O movimento repensava toda a cadeia produtiva, iniciando pela extração de matérias-primas. Os principais desafios da construção sustentável envolvem (i) processo de gestão, (ii) execução, (iii) consumo de materiais, energia e água, (iv) impactos no ambiente urbano e no meio ambiente natural, (v) as questões sociais, culturais e econômicas. A “Agenda 21” conclui afirmando que o maior desafio é o de tomar ações preventivas imediatas e preparar toda a cadeia produtiva para as mudanças que são necessárias ao processo construtivo.

Os desafios para o setor da construção são diversos, porém, em síntese, consistem na redução e na otimização do consumo de materiais e energia, na redução dos resíduos gerados, na preservação do ambiente natural e na melhoria da qualidade do ambiente construído. Para tanto, recomenda-se:

- Mudanças dos conceitos da arquitetura convencional na direção de projetos flexíveis com possibilidade de readequação para futuras mudanças de uso e atendimento de novas necessidades, reduzindo as demolições;
- Busca de soluções que potencializem o uso racional de energia ou de energias renováveis;
- Gestão ecológica da água;
- Redução do uso de materiais com alto impacto ambiental;
- Redução dos resíduos da construção com modulação de componentes para diminuir perdas e especificações que permitam a reutilização de materiais (Fonte: Ministério do Meio Ambiente).

As tendências atuais em relação ao tema da construção sustentável caminham em duas direções. De um lado, centros de pesquisa em tecnologias alternativas pregam o resgate de materiais e tecnologias vernáculos com o uso da terra crua, da palha, da pedra, do bambu, entre outros materiais naturais e pouco processados, para serem organizados em ecovilas e comunidades alternativas. De outro lado, empresários apostam em “empreendimentos verdes”, com as certificações, tanto no âmbito da edificação quanto no âmbito do urbano. No entanto, muitos edifícios rotulados como verdes refletem apenas esforços para reduzir a energia incorporada e são, em muitos outros aspectos, convencionais, tanto na aparência quanto no processo construtivo. Além disso, devem-se questionar os

benefícios que um selo desenvolvido para outra realidade pode trazer, especialmente para países como o Brasil, que ainda não resolveu seus problemas mais básicos, como pobreza e desigualdade social (Fonte: MMA).

De uma forma resumida, o impacto ambiental da construção civil depende de toda uma enorme cadeia produtiva: extração de matérias-primas, produção e transporte de materiais e componentes, concepção e projetos, execução (construção), práticas de uso e manutenção e, ao final da vida útil das construções, a demolição/desmontagem, além da destinação de resíduos gerados ao longo do ciclo das edificações. Esse processo é influenciado por normas técnicas, códigos de obras e planos diretores e ainda políticas públicas mais amplas, incluindo as fiscais. Todas essas etapas envolvem recursos ambientais, econômicos e têm impactos sociais que atingem a todos os cidadãos, empresas e órgãos governamentais, e não apenas aos seus usuários diretos. O aumento da sustentabilidade no setor depende de soluções em todos os níveis, articuladas dentro de uma visão sistêmica (AGOPYAN; JOHN, 2011).

### **2.3 GESTÃO DE RESÍDUOS**

Desde a sociedade primitiva, os seres humanos e os animais utilizaram os recursos da terra para a sobrevivência e, conseqüentemente, geraram descarte de resíduos a partir disso. Antigamente, a coleta dos resíduos não era um problema significativo já que a população era muito pequena, as áreas disponíveis eram abundantes e a vida das sociedades existentes muito simples. Porém, os problemas de saúde pública surgiram na Europa, no século XIV, quando metade da sua população morreu devido à peste negra, epidemia provocada pela falta de gestão dos resíduos (ISAIA, 2010).

Somente no século XIX, as medidas de controle e gestão de resíduos domésticos e urbanos passaram a ser consideradas importantes. Foi quando o setor público percebeu que os resíduos de comida tinham que ser recolhidos e dispostos de uma forma sanitária para controlar os roedores, as moscas e outros vetores sanitários (ISAIA, 2010).

Ao passar dos séculos, a sociedade se tornou complexa com um crescimento populacional significativo. Segundo a ONU, a população mundial superou 07 bilhões de pessoas, projetando-se para 9,3 bilhões para o ano 2050. A ciência e a

tecnologia tiveram um desenvolvimento vertiginoso, gerando sistemas de produção complexos para atender a uma sociedade de consumo exigente e crescente.

Existem muitas definições para o desenvolvimento sustentável. Em comum, todas elas apontam para o fato de que o desenvolvimento promovido pela humanidade nos últimos 250 anos, que permitiu enormes ganhos em termos de qualidade e expectativa de vida para os seres humanos, vem alterando significativamente o equilíbrio do planeta e ameaçando a sobrevivência da espécie (AGOPYAN; JOHN, 2011).

É também fato que apesar de todo o desenvolvimento, quase 50% da população mundial não têm saneamento básico, cerca de ¼ da população mundial (mais de 1,5 bilhão de pessoas) ainda vive na extrema pobreza, com menos de US\$ 1,25 por dia e cerca de 26% das crianças com menos de 5 anos, que vivem nos países em desenvolvimento, enfrentam problemas de subnutrição. Em consequência, é também consenso que o desenvolvimento sustentável deve buscar resolver demandas sociais (AGOPYAN; JOHN, 2011).

O desafio é, na verdade, a busca de um equilíbrio entre proteção ambiental, justiça social e viabilidade econômica. Aplicar o conceito de desenvolvimento sustentável é buscar, em cada atividade, formas de diminuir o impacto ambiental e de aumentar a justiça social dentro do orçamento disponível (AGOPYAN; JOHN, 2011).

A Constituição Federal do Brasil de 1988, em seu Art. 225, parágrafo 3º, estabelece que: “As condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, pessoas físicas ou jurídicas, a sanções penais e administrativas, independentemente da obrigação de reparar os danos causados”.

A afirmação acima garante que a gestão inadequada de resíduos pode levar seus responsáveis ao pagamento de multas e a sanções penais e administrativas, como exemplos: prisão e/ou multa. Além disso, o dano causado ao meio ambiente, tais como, poluição de corpos hídricos, poluição do solo, poluição do ar, contaminação de lençol freático, desmatamento, provocando danos à saúde dos cidadãos, tais como: doenças respiratórias, diarreias de origem bacteriana, micoses causadas por fungos, deve ser reparado pelos responsáveis pela geração dos resíduos. A reparação do dano, na maioria dos casos, é muito complicada tecnicamente e envolve um valor maior do que a prevenção. Em outras palavras, a gestão adequada de resíduos através de planejamento apresenta-se como uma solução para diversos segmentos.

## **2.4 DIFERENÇA ENTRE RESÍDUO E REJEITO**

Resíduo sólido é uma expressão que está presente no dia a dia de todos. Quando compramos um produto com embalagem, descascamos uma fruta ou simplesmente utilizamos um item até o fim da sua vida útil, geramos resíduo. Mas existe uma distinção que será cada vez mais importante, principalmente a partir de 2014: qual é a diferença entre rejeito e resíduo?

É a partir do que sobra de determinado produto (embalagem, casca) ou processo (uso do produto) que o resíduo sólido é gerado, mas ele pode ser consertado, servir para outra finalidade (reutilização) ou até ser reciclado. Já o rejeito é um tipo específico de resíduo sólido – quando todas as possibilidades de reaproveitamento ou reciclagem já tiverem sido esgotadas e não houver solução final para o item ou parte dele. Trata-se, assim, de um rejeito, e as únicas destinações plausíveis são encaminhá-lo para um aterro sanitário licenciado ambientalmente ou para a incineração (Fonte: <http://rmai.com.br>).

Essa diferenciação é importante devido à implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que entrará em vigor a partir de 2014. A fiscalização tende a ser rígida com relação à distinção. A partir de agosto de 2014, o operador do aterro sanitário deverá receber apenas rejeitos. Caso contrário, (a empresa) estará sujeita às penalizações do Ministério Público. Lembrando que, com a PNRS, todos os lixões devem ser eliminados para darem lugar a aterros sanitários.

## **2.5 ESTADO DA ARTE**

Foi no ano de 1928 que começaram a serem desenvolvidas pesquisas relacionadas à produção de concreto com agregados reciclados. O surgimento significativo de obras utilizando essas técnicas deu-se posteriormente à 2ª Guerra Mundial, na reconstrução das cidades europeias. Visando dar uma solução final aos entulhos e ruínas gerados, e atendendo a demanda por agregados na época, o homem começou a desenvolver técnicas de produção de concreto com agregados reciclados. Dessa forma, pode-se relatar que o surgimento de tecnologias relacionadas ao concreto com agregados reciclados teve seu início no ano de 1946,

porém, ainda não se tornou uma tecnologia amplamente difundida. No entanto, de acordo com Levy e Helene (2004), países como Estados Unidos, Japão, Bélgica, França e Alemanha têm utilizado técnicas em maior escala. Esse fato pode ser explicado pelas condições geológicas e mineralógicas adversas impostas pela natureza nesses países, além dos mesmos serem nações tecnologicamente bem desenvolvidos (GRANZOTTO, 2010).

É importante ressaltar que não foram encontradas pesquisas semelhantes como uso do resíduo da produção de Scheelita, tornando este trabalho pioneiro na incorporação do resíduo ao concreto para se conhecer tal resíduo como possível material de construção.

Machado (2012) pesquisou a incorporação do resíduo de Scheelita em matriz cerâmica caulínica, como será visto no **item 2.5.12**.

A seguir, serão apresentados alguns resíduos que foram pesquisados com o objetivo de se tornarem agregado-componentes do concreto, e que foram utilizados como referências neste estudo.

### **2.5.1 Cinza da Casca de Arroz (CCA)**

A utilização da CCA como material pozolânico é investigada desde a década de 70. A Índia e os EUA são os principais países que realizam pesquisa sobre a cinza da casca de arroz. Foi a partir da década de 80, com o desenvolvimento da tecnologia do concreto de alto desempenho, que a preocupação em obter um máximo de pozolanicidade do material se tornou premente. A produção de CCA com elevada pozolanicidade possibilita sua utilização no lugar da sílica ativa no concreto de alto desempenho (DAFICO, 2009).

Metha foi o pesquisador que mais publicou trabalhos sobre a utilização da CCA no concreto. Em um só artigo, onde faz uma ampla revisão sobre o uso da cinza de casca de arroz no concreto (MEHTA, 1992), o autor cita 12 outros trabalhos de sua autoria sobre o assunto. Ele chegou a desenvolver e patentear uma fornalha com a capacidade de controlar as condições de tempo e de temperatura de queima da casca de arroz para que a sílica permaneça em estado amorfo e com elevada superfície específica, propiciando a produção de uma cinza de altíssima reatividade, porém com elevado teor de carbono, o que resulta em uma cinza de cor preta e de baixo valor comercial.

Estudos experimentais realizados na Universidade da Califórnia mostram que, quando a temperatura de queima da casca de arroz é baixa e o tempo de exposição à alta temperatura é pequeno, a sílica contida na cinza é amorfa. A cinza nessas condições apresenta alto índice de vazios interna e área específica de 50 a 110 m<sup>2</sup>/g, quando medida por adsorção de nitrogênio (MEHTA, 1992).

No Brasil, a maioria dos trabalhos sobre o uso de cinzas de casca de arroz como material pozolânico foi realizada com cinzas residuais oriundas da queima da casca em beneficiadoras do cereal. Em alguns casos, quando as beneficiadoras possuíam queimadores de leito fluidizado, a temperatura de queima era controlada para evitar a formação de sílica cristalina. Nos demais, os estudos foram realizados com cinzas obtidas de queimas sem um controle efetivo do tempo e da temperatura de queima. De um modo geral, os resultados obtidos nas pesquisas brasileiras concluíram que a cinza de casca de arroz é uma excelente pozolana, com desempenho comparável ao da sílica ativa (resíduo da fabricação do ferro-silício e/ou do silício metálico). Uma constatação importante e, até certo ponto, surpreendente dos trabalhos nacionais é que esse desempenho foi satisfatório mesmo para cinzas que exibiam picos cristalinos nos ensaios de difração de raios X, contrariando a opinião de muitos especialistas internacionais (DAFICO, 2009).

### **2.5.2 O uso da borracha de pneu**

O processo de reciclagem vem sendo estudado e pesquisado em diversas áreas visando evitar maiores danos ao meio ambiente e conseqüentemente ao ser humano. Há uma grande necessidade de se preservar os recursos naturais, principalmente os não renováveis, criando alternativas para utilização de outros materiais em substituição ao insumo natural (GRANZOTTO, 2010).

Um das soluções encontradas pelo campo da construção é a utilização de agregados oriundos de processos de reciclagem. Esses materiais podem ser provenientes de processos de demolição, ou até mesmo de rejeitos originários de outros produtos gerados pelo homem, tais como: pneus, plásticos, vidros, solas de sapato, entre outros (GRANZOTTO, 2010).

O processo de urbanização nas grandes cidades, a diminuição da quantidade e tamanho dos aterros, o crescimento populacional e a maior utilização de materiais descartáveis geram um expressivo aumento do número de resíduos descartados no

ambiente. Nas últimas décadas, tem-se observado o reaproveitamento de alguns tipos de resíduos, como, por exemplo, aqueles produzidos pela construção civil. Porém, a mesma situação não ocorre para outros tipos de resíduos, como, por exemplo, a borracha proveniente dos pneus de automóveis. Uma alternativa para o reaproveitamento de pneus inservíveis consiste na utilização do pó de borracha como material de substituição parcial do agregado miúdo em concretos. Em Granzotto (2010), foram pesquisados concretos de baixa resistência com diferentes taxas de adição de pó de borracha. Os resultados obtidos revelam que é possível se obter uma taxa ótima de adição sem que ocorram perdas significativas para a resistência à compressão e à tração do concreto com adições.

### **2.5.3 Resíduo do polimento do porcelanato**

Steiner (2011) avaliou a utilização do resíduo do polimento do porcelanato à composição do concreto, mas precisamente na fabricação de blocos de concreto para vedação. Na caracterização do RPP, foram realizados ensaios de granulometria a laser, fluorescência de raios X (FRX) e absorção atômica. No estudo, foram utilizadas quatro composições de argamassa, de traço 1:3, adicionando 0, 5, 10 e 20% de resíduo em massa de cimento, onde foram avaliadas, através de ensaios, as seguintes características: índice de consistência, resistência à compressão e medida do calor de hidratação (calorimetria). Os resultados mostraram que a incorporação do resíduo resultou em uma melhora nas características de trabalhabilidade e consistência das argamassas na hidratação, acelerando e/ou reagindo com os compostos do cimento, indicando atividade pozolânica da sílica presente com hidróxido de cálcio. O ganho de resistência à compressão axial foi, em média, 50% para uma adição de 20% de resíduo de RPP.

### **2.5.4 Politereftalato de estireno – PET**

Menezes (2011) estudou a incorporação de fibras de PET proveniente da reciclagem de garrafas de refrigerante para fabricação de vassouras. As fibras utilizadas tinham 02 mm de largura por 15 mm de comprimento e foram incorporadas a concretos dosados para um  $f_{ck}$  de 30 MPa, com relação água/cimento de 0,46. Os traços foram confeccionados em um canteiro de obra, com objetivo de se avaliar a

resistência mecânica dos concretos submetidos a elevadas temperaturas. Os corpos de prova dos concretos com e sem adição de fibras de PET foram ensaiados após exposição às temperaturas: ambiente (30°C), 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 600°C e 900°C. Foi verificado que o concreto perde, de forma significativa, a resistência mecânica quando exposto a temperaturas maiores que 300°C. Entretanto, o uso da fibra de PET pode retardar o risco de colapso de estruturas pela formação de uma rede de canais que facilita a fuga do vapor d'água, reduzindo a poropressão no interior do elemento estrutural.

Pietrobelli (2010) avaliou o comportamento do concreto com adição do resíduo de polietileno. Na pesquisa, foram estudadas algumas propriedades do concreto produzido com diferentes teores de adição do resíduo de polietileno em diferentes traços de concreto. O objetivo principal do estudo foi avaliar o comportamento dos materiais cimentados reforçados com fibras. Na pesquisa, foram feitos ensaios de caracterização dos agregados aturais e do agregado de PET, os quais são: granulometria, massa específica e massa unitária. Após essa etapa, foram calculados os traços de referência confeccionados apenas com agregados naturais, e, após conhecida a resistência à compressão axial dos mesmos, foram definidos os traços com frações de polietileno. A segunda etapa foi a confecção dos corpos de prova com diferentes frações de polietileno com a identificação do *slump test* e, posteriormente, o rompimento dos mesmos aos 07, 14 e 28. Os concretos fabricados com polietileno apresentaram perda na trabalhabilidade devido às características do polietileno, propriedades que afetam diretamente a resistência do concreto produzido, pois o resíduo de PET tem uma baixa resistência à compressão.

### **2.5.5 Resíduo de cerâmica vermelha**

Cabral e Dal Molin (2009) avaliaram a incorporação de resíduos de cerâmica vermelha à composição de concreto. No estudo, foram analisadas as seguintes propriedades: resistência à compressão axial, o módulo de deformação e o volume de poros permeáveis. Utilizaram o resíduo da cerâmica vermelha tanto como agregado miúdo e como o agregado graúdo à composição do concreto. Os resultados não foram satisfatórios para a substituição do agregado graúdo natural. Muito provavelmente devido ao agregado graúdo natural, a brita, ter resistência à compressão maior que o agregado graúdo reciclado. O resultado mostrou um

decréscimo na resistência à compressão axial para o concreto com agregado graúdo reciclado. Já a substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado obteve resultados satisfatórios, tendo um acréscimo na resistência à compressão axial. Para as outras propriedades, tanto a utilização do agregado graúdo reciclado, como também o agregado miúdo reciclado influenciaram negativamente nos resultados.

#### **2.5.6 Resíduo do beneficiamento da ágata**

Betat, Pereira e Verney (2009) apresentaram um trabalho sobre a utilização do resíduo do beneficiamento da ágata. No estudo, foi analisada a resistência à compressão axial e o consumo do cimento, para as porcentagens 25%, 50% e 75% de resíduo de ágata. Os resultados da resistência à compressão foram superiores em 10% do concreto de referência para a faixa de 50%. Em relação ao consumo de cimento, a faixa de 25% foi a que resultou em um maior consumo, para uma mesma resistência característica. Já a faixa de 75% teve o menor consumo de cimento, cerca de 4% a menos para uma resistência característica de 20 MPa; e 4 – 6% a menos de cimento para uma resistência característica entre 25 e 30MPa.

#### **2.5.7 Resíduo da serragem da pedra Cariri**

Moura, Leite, e Bastos (2013) apresentaram um estudo sobre a utilização do resíduo da serragem da pedra Cariri em substituição parcial do cimento para confecção de concretos convencionais. No estudo, foram analisadas as propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e tração por compressão diametral) e parâmetros de durabilidade (absorção por imersão e por sucção capilar). Foram produzidos 09 traços, variando a relação a/c (0,45; 0,55; 0,65) e os teores de substituição (0%, 10% e 20%) do cimento. Os resultados demonstram que a utilização de RSPC no concreto proporcionou uma redução nas resistências à compressão e à tração por compressão diametral. Porém, em relação aos parâmetros de durabilidade, os concretos com RSPC apresentaram comportamento compatível com os concretos de referência. De um modo geral, do ponto de vista técnico, o RSPC não proporcionou resultados satisfatórios para aplicação em concreto.

### **2.5.8 Resíduo de pó de brita**

Pimenta (2012) apresentou o estudo referente à viabilidade da substituição parcial da areia natural por pó de brita na produção de concreto convencional. Foram realizados ensaios de caracterização granulométrica, bem como estudo da dosagem para obtenção de concreto com resistência de 20MPa, sendo analisada a resistência a compressão simples aos 7 e 28 dias.

Os resultados foram satisfatórios mostrando-se a viabilidade da utilização do pó de pedra para o concreto convencional, sendo necessário um controle tecnológico, devido à inconformidade nos processos de britagem.

Em resumo, a principal vantagem do uso do pó de brita no concreto, além de econômica, esta relacionada ao meio ambiente, uma vez que sua utilização significa redução dos danos causados pela exploração indiscriminada da areia presente nos leitos dos rios. Além de que, sua utilização elimina um rejeito, reduzindo ainda mais os impactos ao meio ambiente.

### **2.5.9 Pó de vidro**

Gomes (2011) analisou as propriedades mecânicas do concreto com a reutilização de retalhos de vidro, que são as sobras de vidraçarias, em sua maioria proveniente da indústria da construção. Nesse estudo foi utilizado o pó de vidro na composição do concreto, adotando como variável a concentração de vidro adicionado de 0%, 3%, 6% e 9% (referentes à massa peso de cimento). Para o estudo, foram realizados ensaios de plasticidade, de resistência à compressão e de módulo de deformação por compressão. Com os resultados obtidos nos ensaios de Compressão Axial e de Módulo de Elasticidade por compressão nota-se que a variação entre as amostras com as diferentes adições de vidro ficou próxima a 5% em relação à amostra padrão com 0% de adição.

O autor, em suas conclusões, considerou a inviabilidade do uso do vidro no que se refere à melhoria das propriedades do concreto. Vale salientar que o vidro é 100% reciclável, e que sua utilização como agregado do concreto poder ser comprometida, mesmo obtendo resultados próximos ao concreto de referência.

### **2.5.10 Metacaulim e Sílica Ativa**

Farias de Medeiros, Goobi, Groenwold, e Helene (2013) estudaram a durabilidade do concreto armado, em ambientes de atmosfera marinha, através do ataque por íons cloreto. A previsão do tempo de vida útil, em ambientes desse tipo, é algo ainda em estudo e sem consenso no meio técnico e científico. O estudo propõe um caminho para interpretar dados de difusão de cloretos no concreto armado de alta resistência contendo adição de metacaulim e sílica ativa. Os resultados apresentados mostraram que o metacaulim e a sílica ativa aumentaram a vida útil de serviço em ambientes contaminados com cloretos em 240% e 440%, respectivamente. Portanto, evidencia a eficiência da adição de metacaulim e da sílica ativa para a produção de concretos mais duráveis em regiões com grande influência de maresia.

### **2.5.11 Pó de mármore**

Dos Santos e Lachowski Júnior (2012) estudaram a viabilidade técnica do uso do pó de mármore proveniente do processo de serragem de blocos de rochas em placas. Grande parte dos processos industriais são fontes geradoras de resíduos, prejudicando o meio ambiental. A utilização de resíduos industriais na Construção Civil apresenta-se como uma excelente alternativa para diminuição do impacto ambiental e contribuindo para o desenvolvimento sustentável, considerando que a Construção Civil é o setor da atividade tecnológica que consome grande volume de recursos naturais e parece ser um dos mais indicados para absorver os resíduos sólidos. O resíduo gerado (pó de mármore) é aproximadamente 25% a 30% da massa do bloco, na maioria dos casos, é depositado em pátios das empresas ou descartado de maneira clandestina, como exemplo: margens de estradas. No estudo foi analisada a substituição em teores de 4% de pó de mármore em relação à massa de cimento em concretos auto-adensáveis. Foram avaliadas as propriedades do concreto endurecido (resistência à compressão axial), e parâmetros de durabilidade (absorção por imersão). A análise dos resultados permitiu concluir que o resíduo do corte do granito não apresenta riscos ambientais, e que sua utilização como adição em concretos é viável tecnicamente, sendo que 4% de substituição apresenta

melhor desempenho sem nenhuma interferência na resistência do concreto comparando com a sílica ativa.

Os autores concluíram que os concretos com adição de pó de mármore apresentaram maior coesão e consistência e uma diminuição da exsudação. Como o resíduo não possui atividade pozolânica, seu efeito físico devido a sua alta finura promoveu um refinamento nas estruturas de poros. Este efeito contribuiu para uma maior densificação da zona de transição e da Matriz cimentícia, e conseqüentemente um ganho de resistência à compressão. O efeito microfíler é o principal fator para a densificação da zona de transição, contribuindo para um ganho nas propriedades mecânicas nas idades iniciais.

### **2.5.12 Scheelita na matriz cerâmica**

Machado (2012) estudou a incorporação do resíduo de Scheelita em matriz cerâmica caulinitica, proveniente do município de Boa Saúde – RN, em percentuais de 5%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, avaliando sua microestrutura, propriedades físicas e formulação. As matérias-primas foram caracterizadas através dos ensaios de Fluorescência de raios X (CaO – 41,34% e SiO<sub>2</sub> – 19,05% os maiores percentuais), Difração de raios X (Calcita – CaCO<sub>3</sub> e Quartzo – SiO<sub>2</sub> foram os principais minerais encontrados), Análise Térmica Diferencial e Análise Termogravimétrica. Foram realizados ainda ensaios tecnológicos de Perda ao Fogo, Absorção de água, Porosidade Aparente, Massa Específica Aparente e Tensão de Ruptura à Flexão, além da Microscopia Eletrônica de Varredura, analisando-se suas propriedades físicas e mecânicas. A adição do resíduo de Scheelita favoreceu a estabilidade dimensional e uma elevada resistência mecânica no produto final até 30% de resíduo. Dessa forma, controlando-se o teor de absorção de água de no máximo 20%, além da impermeabilidade que não aceitará desprendimento de gota na face inferior das telhas, pode-se utilizar a massa cerâmica com resíduo de Scheelita (no máximo 20%) para produção das mesmas.

## **2.6 BREVE HISTÓRICO SOBRE A MINERAÇÃO NO NORDESTE BRASILEIRO**

É comum afirmar-se que a mineração no Nordeste se iniciou a partir da Segunda Guerra Mundial. Esta afirmação, segundo Andrade (1987), deve ser aceita de forma

relativa; o incentivo à exploração mineral foi estimulado inegavelmente pelos acontecimentos da Segunda Guerra Mundial, quando os aliados necessitaram abastecer-se de minerais, anteriormente fornecidos pela própria Europa e pelos países do Extremo Oriente. Ocupada a Europa pelos alemães e o Oriente pelos japoneses, necessitaram os americanos de descobrir e intensificar a exploração de jazidas não exploradas ou insuficientemente exploradas, sem levar em conta os custos de produção. As razões estratégicas eram no momento histórico mais importante que as razões de ordem econômica. Daí o grande surto de exploração da Scheelita no Rio Grande do Norte e as pesquisas de minerais estratégicos. Na época era fácil recrutar mão-de-obra não especializada para a mineração, uma vez que, sendo o Nordeste uma região de clima semi-árido, tinham os trabalhadores rurais, durante o ano, um curto período de trabalho na agricultura, ficando ociosos durante a longa estação seca. Além disso, a remuneração oferecida pela mineração era bem superior àquela obtida com a agricultura, e a mão-de-obra do chefe de família podia ser, até certo ponto, substituída pela da própria família. Havendo o minério e força de trabalho disponível, ao mesmo tempo em que eram relegados os custos da produção, pôde a mineração tomar-se uma atividade econômica importante, quer pelo volume de produção, quer pelo emprego de capital e pela oferta de emprego ao trabalhador, trazendo maior dinamização a áreas mineradoras como o Seridó. Finda a guerra e a conseqüente demanda do mineral, a maior porção das empresas mineradoras foi forçada a encerrar as suas atividades; apenas aquelas bem sucedidas, que dispunham de maior volume de capital, puderam se modernizar e enfrentar a concorrência do mercado internacional. (Fonte: Mineração no nordeste: depoimentos e experiências).

Este fato, porém, não deve levar a crer que a preocupação com a descoberta de minérios e mesmo com a exploração de algumas jazidas não tenha sido uma constante desde a ocupação do território nordestino. Já no século XVI, falava-se na existência de minas de prata nos sertões do Rio Real, na Bahia e em Sergipe, em terras doadas a Caramuru. Um dos seus netos, Belchior Dias Moréia, passou vários anos no sertão e afirmou haver descoberto minas de prata, exigindo do Rei uma série de direitos e de honrarias em função desta descoberta. Não sendo atendido, não revelou o segredo das minas de prata que foram objeto de romance e ensaios sobre a história nordestina. Ainda do primeiro século de colonização, foram às entradas de Antônio Dias Adorno e de João Coelho de Souza que exploraram as bacias dos rios Paraguaçu e de Contas,

na porção oriental da Chapada Diamantina. (Fonte: Mineração no nordeste: depoimentos e experiências).

O próprio desenvolvimento do povoamento e da produção de açúcar estimulou, desde os primeiros tempos, a exploração de argila para atender à demanda de tijolos, telhas e de calcário, utilizado na construção civil e na produção do açúcar mascavo. No período anterior ao uso do cimento, os velhos sobrados das cidades litorâneas eram construídos com "caliça" - mistura de cal, argila e óleo de baleia. Também a cal virgem é tradicionalmente usada na pintura de paredes. (Fonte: Mineração no nordeste: depoimentos e experiências).

Assim, observamos que em áreas restritas e em proporções modestas, se comparada à agricultura e à pecuária, a mineração teve certa importância no período anterior à II Guerra Mundial, ao contrário do que geralmente se afirma. (Fonte: Mineração no nordeste: depoimentos e experiências)

## **2.7 A INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO DA SCHEELITA NO RN**

O Rio Grande do Norte é um dos estados mais ricos em jazidas minerais do Nordeste, tendo uma produção elevada dentro da produção nacional. Ele é tradicionalmente produtor de sal marinho e, desde a década de 20, de gipsita. Foi durante a guerra, porém, que o estado ganhou maior importância, quando iniciou, em escala comercial, a produção de Scheelita e pegmatito. Posteriormente, ele passou a produzir outros minérios, como a Diatomita, o calcário e as pedras semipreciosas - águas marinhas e ametistas. (Fonte: Mineração no nordeste: depoimentos e experiências).

Em 2011, o Rio Grande do Norte exportou US\$ 3,4 milhões em minério concentrado de Tungstênio, equivalente a 60% das exportações nacionais. Em 2012, nos três primeiros meses as exportações desse produto pelo estado já chega a US\$ 1,55 milhão (valor 03 vezes maior que o exportado no mesmo período de 2011), representando 70% das exportações brasileiras de Tungstênio (Fonte: DNPM).

Alguns fatores relevantes para a ampliação da produção de Tungstênio no estado do Rio Grande do Norte são: a implantação do Gasoduto Assu-Seridó, na região do Seridó/RN, irá garantir a distribuição da produção nas regiões de mineração. Além disso, no estado, as empresas recebem benefícios fiscais atraentes (tributação para

minerais: redução de 12% para 7,2%); e espera-se implantar o Centro Tecnológico de Minérios para a pesquisa e qualificação de mão de obra.

A Mina Brejuí, de onde foi extraído o resíduo utilizado nesta pesquisa, está localizada no município de Currais Novos, no estado do Rio Grande do Norte – Brasil, Figura 2.1. Considerada a maior mina de Scheelita da América do Sul, a Mina Brejuí iniciou a exploração de suas atividades em 1943, data da descoberta do minério em nosso município. Somente em 1954, a Mina Brejuí foi constituída empresa com o nome de Mineração Tomaz Salustino S/A, sendo concessionário o Desembargador Tomaz Salustino Gomes de Melo.



Figura 2.1 – Mapa do estado do Rio Grande do Norte – Brasil, com destaque para o município de Currais Novos.

Fonte: Wikipédia.

A mineração em Currais Novos/RN – Brasil teve o seu apogeu em plena 2ª Guerra Mundial, fornecendo toneladas de minérios às indústrias do aço. Durante esse período, o progresso da sociedade se fez notar através da construção do Tungstênio Hotel, cinema, posto de puericultura, emissora de rádio, estádio de futebol, campo de pouso, colégios, hospital e casa do idoso (Fonte: [www.minabrejuui.com.br](http://www.minabrejuui.com.br)).

A partir dos anos 80 do século XX, inicia-se o declínio da mineração em consequência da oscilação dos preços internacionais da Scheelita e da utilização de outros minérios para a fabricação de artefatos industriais e tecnológicos, levando a Mina Brejuí a reduzir suas atividades de extração mineral e buscar novas alternativas econômicas (Fonte: [www.minabrejuui.com.br](http://www.minabrejuui.com.br)).

Desde o final da década de 90, as minerações do município de Currais Novos estão voltando às suas atividades. Já são mais de 300 empregos gerados até o

momento. Além da volta das atividades minerais, a Mina Brejuí tornou-se, nos últimos anos, o maior parque temático do Rio Grande do Norte, sendo visitada diariamente por turistas e estudantes vindos de toda parte do Brasil e do Exterior. Foram mais de 20 mil turistas nos últimos anos (Fonte: [www.minabrejui.com.br](http://www.minabrejui.com.br)).

Em 2010, conforme dados do DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral, as reservas lavráveis de Tungstênio totalizaram cerca de 40 mil toneladas. Destas, cerca de 70% advêm dos recursos de Scheelita do estado do Rio Grande do Norte e são caracterizadas pelo elevado teor de Trióxido de Tungstênio ( $WO_3$ ).

Em 2010, o Brasil exportou 122 toneladas de minério de Tungstênio e seus concentrados, equivalente a 70 toneladas de Tungstênio (W) contido e registrou faturamento de US\$ 1,4 milhão, ou seja, houve queda de 38% na quantidade e 22% no faturamento em relação ao ano anterior. Os principais países compradores foram: Bolívia (46%), Países Baixos (15%), Reino Unido e China (13%, cada) e os Estados Unidos (7%) (Fonte: DNPM).

O município de Cotia, no estado de São Paulo, recebeu 69% do concentrado de Scheelita produzido no ano de 2010 para uso nos setores de ferro-ligas ferro ligas e fundição (Fonte: DNPM).

O Tungstênio é utilizado na fabricação das caixas pretas de aviões, nas brocas das sondas de perfuração de petróleo em águas profundas, na indústria metalúrgica, em equipamento de raios X, e até as esferas das canetas esferográficas são feitas de aço com Tungstênio. A indústria que projeta foguetes espaciais também utiliza o Tungstênio (Fonte: DNPM).

Os fatores ambientais mais afetados na extração da Scheelita estão relacionados ao solo (erosões), flora (abertura de acessos e picadas), ar (britagem e detonações), poluição sonora (martelletes pneumáticos), gases (ustulação da pirita) e alterações estéticas da paisagem (pilhas de rejeito).

A consciência nos dias atuais de que o manejo adequado do meio ambiente é o segredo para a melhor qualidade de vida da humanidade e para a própria sobrevivência da terra representa uma base sólida para a defesa da questão ambiental (Fonte: [www.sustentabilidade.sebrae.com.br](http://www.sustentabilidade.sebrae.com.br)).

### 2.7.1 Etapas da produção da Scheelita

A extração do minério Scheelita é dividida em várias etapas. A primeira delas é a investigação do teor de Scheelita, onde são realizados testemunhos no maciço rochoso e realizado ensaios em laboratório. Dependendo do teor de Scheelita, a segunda etapa é a implosão do maciço rochoso para a extração de pedregulhos, Figura 2.2. Após a implosão, os fragmentos são transportados para o exterior da mina, Figura 2.3.



Figura 2.2 – Fragmentos da rocha.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 2.3 – Transporte dos fragmentos.

Fonte: acervo pessoal.

Ao serem retirados do interior da mina, os pedregulhos passam por uma seleção (terceira etapa), na qual os maiores pedregulhos são quebrados manualmente com uso de ferramentas, para que cheguem à britagem com dimensões menores que 200 mm, Figura 2.4.



Figura 2.4 – Triagem dos pedregulhos.

Fonte: acervo pessoal.

A quarta etapa é o transporte do material até a britagem. Na britagem (quinta etapa), o material é depositado em um “britador”, Figura 2.5, no qual os pedregulhos são britados e transformados em pequenas pedras, Figura 2.6.



Figura 2.5 – Britador.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 2.6 – Pedras após o britador.

Fonte: acervo pessoal.

Após o britador, inicia-se uma sequência de esteiras. Os fragmentos maiores vão para um “rebritador” e retornam para a esteira após a saída do britador, Figura 2.7.



Figura 2.7 – Início das esteiras e “rebitador”.

Fonte: acervo pessoal.

Após os britadores, o material é estocado em um depósito, Figura 2.8, no qual é iniciada uma nova sequência de esteiras na saída do depósito, Figura 2.9. Nessa etapa, o material já está com a granulometria de uma areia, mas ainda há fragmentos com dimensões próximas a 20 mm, Figura 2.10 e Figura 2.11.



Figura 2.8 – Depósito após britadores.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 2.9 – Saída do depósito.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 2.10 – Material após estocagem.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 2.11 – Sequência de esteiras.

Fonte: acervo pessoal.

A próxima etapa é a hidratação do material, que segue por uma esteira, Figura 2.12, e cai em um depósito onde também é inserida a água, Figura 2.13.



Figura 2.12 – Material caindo em um depósito e sendo hidratado.

Fonte: acervo pessoal



Figura 2.13 – Recipiente para a hidratação do material.

Fonte: acervo pessoal

Com o material hidratado, e ainda com parte do material gráudo, estes seguem para um depósito, Figura 2.14, em que há duas peneiras de 25 mm de abertura em movimento constante, deixando o material com menor granulometria em suspensão. Esse material em suspensão vai para um recipiente, Figura 2.15, e deste é distribuído para as mesas vibratórias, Figura 2.16 e Figura 2.17.



Figura 2.14 – Depósito com peneiras.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 2.15 – Depósito para distribuição do material.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 16 – Mesas vibratórias.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 17 – Mesas vibratórias.

Fonte: acervo pessoal.

Com a vibração da mesa, o material que lá está vai se separando. A Figura 2.18 mostra com exatidão a separação do material em diferentes granulometrias. A faixa branca é a Scheelita. Os outros componentes vão para um recipiente, Figura 2.19, no qual será reprocessado em outras mesas vibratórias.



Figura 2.18 – Detalhe da Scheelita nas mesas vibratórias.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 2.19 – Material para reprocessamento.

Fonte: acervo pessoal.

A empresa passou a reprocessar o resíduo após a primeira triagem, pois constatou, em ensaios, que ainda há uma porcentagem de Scheelita no resíduo da extração. O material, após o reprocessamento, é retirado do processo de produção por equipamento que contém uma hélice, Figura 2.20. Com o movimento da hélice, o equipamento empurra o material para um pátio. Esse material, Figura 2.21, é o rejeito da produção da Scheelita, que será transportado para as dunas de rejeito.



Figura 2.20 – Saída do resíduo.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 2.21 – Resíduo da extração da Scheelita.

Fonte: acervo pessoal.

Desde o início da produção da Mina Brejuí, o resíduo produzido recebe o nome de “Siri”. Cerca de 50 m<sup>3</sup> de resíduo são produzidos diariamente (365 dias/ano) pela Mina Brejuí, ou seja, mais de 18.000 m<sup>3</sup> de resíduo são produzidos anualmente.

A Figura 2.22 e a Figura 2.23 mostram uma das dunas de resíduo da extração da Scheelita na Mina Brejuí.



Figura 2.22 – Dunas de resíduos da extração da Scheelita.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 2.23 – Dunas de resíduos da extração da Scheelita.

Fonte: acervo pessoal.

## 2.8 A ROCHA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

As rochas constituem, desde os primórdios da humanidade, os elementos em que as obras de engenharia são construídas e os materiais utilizados em sua construção. Estiveram, e ainda estão presentes nas pirâmides do Egito, construídas há cerca de 4.000 anos, e, durante toda a antiguidade, nos edifícios e monumentos (pontes, estradas, aquedutos, palácios, castelos, igrejas, túmulos) europeus, tanto pela sua abundância como pela sua resistência e durabilidade (ISAIA, 2010).

Rocha é definida como um corpo sólido, natural, resultante de um processo geológico determinado, constituído por agregados de um ou mais minerais, arranjados segundo as condições de temperatura e pressão existentes durante sua formação. Também podem ser corpos de material mineral não cristalino, como o vidro vulcânico (obsidiana) e materiais sólidos orgânicos, como o carvão (ISAIA, 2010).

As propriedades da rocha estão condicionadas a quatro aspectos primordiais, os quais são:

- **Composição mineralógica** → reflete a composição química e as condições de formação e de alteração de cada mineral componente e tem influência decisiva nas propriedades da rocha e na sua durabilidade;

- **Estrutura** → compreende a orientação e as posições de massas rochosas em uma determinada área, bem como as feições resultantes de processos geológicos. Essas massas rochosas são usualmente maciças, o que lhes confere características físicas e mecânicas homogêneas – isotropia. A isorientação mineral, as deformações tectônicas de parte das rochas metamórficas e algumas estruturas de rochas sedimentares conferem-lhes anisotropia, entendida como a variação espacial das propriedades mecânicas, conforme plano de orientação dos minerais e, conseqüentemente, da rocha;
- **Textura** → é o arranjo espacial microscópico dos minerais, muitas vezes exclusivo para alguns tipos de rocha. Está intimamente relacionada à mineralogia e às condições físicas vigentes durante a formação. O índice de vazios/permeabilidade e as resistências mecânicas, em parte, dependem da textura, que também refletem o grau de coesão da rocha;
- **Granulometria** → refere-se ao tamanho dos grãos, um dos principais critérios de classificação das rochas sedimentares. Diferencia, macroscopicamente, rochas ígneas vulcânicas (mais finas: afaníticas) e plutônicas (mais grossas: fenaríticas) e responde pela maior resistência mecânica das primeiras, devido ao maior imbricamento e à coesão dos minerais.

As rochas são divididas em três grandes grupos: rochas ígneas (magmáticas), rochas sedimentares e rochas metamórficas.

As rochas ígneas são aquelas que resultam da solidificação de material rochoso parcial e totalmente fundido (denominado de magma), gerado no interior da crosta terrestre. Exemplo de rocha ígnea: granito.

As rochas sedimentares são aquelas formadas por meio da erosão, transporte (fluvial, marítimo ou eólico) e deposição de sedimentos (clastos ou detritos) derivados da desagregação e decomposição de rochas na superfície terrestre, da precipitação química ou, ainda, do acúmulo de fragmentos orgânicos (ISAIA, 2010).

As rochas metamórficas são derivadas de outras preexistentes que, no decorrer dos processos geológicos, exigem mudanças mineralógicas, químicas e estruturais, no estado sólido, em resposta a alterações nas condições físicas e

químicas impostas em profundidades superiores àsquelas da diagênese (ISAIA, 2010).

## **2.9. PROPRIEDADES DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**

### **2.9.1 Propriedades do concreto fresco**

O concreto é o material de construção mais consumido no mundo. Sua ampla utilização é decorrente de uma combinação positiva de fatores tecnológicos e econômicos, destacando-se sua natureza fluida inicial e o subsequente processo de endurecimento, decorrente das reações de hidratação do cimento. Essas características permitem que a moldagem de corpos com elevada resistência e geometrias variáveis seja realizada de maneira simples e com custos relativamente reduzidos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Em seu estado fluido anterior à cura, os concretos podem ser compreendidos como suspensões bifásicas, compostas por uma fração de partículas grosseiras (agregados graúdos e miúdos), imersas em uma matriz de partículas finas reativas (cimento Portland, pozolanas) e água em teor suficiente para que essas partículas sejam aplicadas no estado fluido (HU; LARRARD, 1995).

#### **2.9.1.1 Consistência (Trabalhabilidade)**

A consistência é usada como um simples índice da mobilidade ou da fluidez do concreto fresco e pode ser medida pelo ensaio de abatimento de tronco de cone ou pelo Aparelho *Vebe*. Sua perda é definida como a perda do abatimento do concreto fresco com o passar do tempo (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A consistência é uma das principais características do concreto, determina a sua aptidão para ser manuseado, que pode ser definido como sendo a maior ou menor capacidade do concreto de se deformar sob a ação de sua própria massa.

A NBR NM 67 (ABNT, 1998) define o método de ensaio para determinação da consistência do concreto fresco através do abatimento do tronco de cone.

A Tabela 2.1 apresenta os valores de abatimento necessários, em função do tipo de obra e do processo de adensamento.

Tabela 2.1 – Valores de abatimento em função do tipo de obra.

Consistência	Abatimento (mm)	Tipo de obra e condição de adensamento
Extremamente seca	0	Pré-fabricação. Condições especiais de adensamento.
Muito seca	0	Grandes massas. Pavimentação. Vibração muito energética.
Seca	0 a 20	Estrutura de concreto armado ou protendido.
Rija	20 a 50	Estruturas correntes. Vibração manual.
Plástica	50 a 120	Estruturas correntes. Adensamento.
Úmida	120 a 200	Concreto inadequado.
Líquida	200 a 250	-

Fonte: Tartuce, 1990.

## 2.9.2. Propriedades do concreto endurecido

### 2.9.2.1 Massa específica

A massa específica de uma substância é definida como sendo a razão entre a massa ( $m$ ) de uma porção compacta e homogênea dessa substância e o volume ( $V$ ) ocupado por ela. Matematicamente, se expressa a massa específica conforme a Equação 2.1.

$$\mu = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Onde  $m$  é a massa da porção de substância e  $V$  é o volume ocupado por ela. No Sistema Internacional de Unidades, a unidade de massa específica é  $\text{kg/m}^3$ .

A massa específica do concreto utilizada normalmente é a massa da unidade de volume, incluindo os vazios. Os valores dessas massas variam entre  $2.000 \text{ kg/m}^3$  a  $2.800 \text{ kg/m}^3$ . Pode-se considerar para efeito de cálculo, quando a massa específica real não for conhecida, o valor de  $2.400 \text{ kg/m}^3$  para o concreto simples e de  $2.500 \text{ kg/m}^3$  para o concreto armado (NBR 6.118/2003).

### **2.9.2.2 Resistência à compressão axial**

Segundo Metha e Monteiro (1994), a resistência de um material é a capacidade de este resistir à tensão sem ruptura. A resistência do concreto à compressão, sua característica mais importante, é medida através de ensaios de compressão axial em corpos de prova, sendo esses ensaios utilizados para o controle de qualidade e a aceitação do concreto utilizado na estrutura. A seguir, alguns fatores que interferem na resistência à compressão do concreto:

- **Relação água/cimento – índice de vazios:** principal responsável pela resistência do concreto à compressão, o fator água/cimento expressa a relação entre o massa da água e o do cimento utilizado no traço do concreto. Ele está ligado ao índice de vazios do concreto endurecido, que por sua vez interfere na resistência do mesmo, pois um menor índice de vazios, ocasionado por uma menor relação água/cimento, proporcionará uma maior área de contato entre os elementos, oferecendo assim uma maior resistência.
- **Tipo de cimento:** o tipo de cimento que se utiliza no concreto, em geral, influi pouco na resistência à compressão definitiva do concreto, sendo mais usado para ajustar outras características do concreto. Segundo Metha e Monteiro (1994), a influência da composição do cimento sobre o índice de vazios da matriz e a resistência do concreto fica limitada às baixas idades.
- **Cura:** as condições de cura do concreto são muito importantes para a resistência à compressão. A cura inadequada ou a alta temperatura pode ocasionar uma perda de água prematura do concreto, deixando espaços vazios, reduzindo assim a resistência.
- **Idade do concreto:** a resistência do concreto à compressão aumenta em função do tempo decorrido da concretagem, mais rápido nas primeiras idades e mais lento a partir do nonagésimo dia, estabilizando após o primeiro ano de vida da estrutura.
- **Adensamento:** feito imediatamente após o lançamento do concreto, o adensamento tem a função de eliminar os vazios existentes na pasta. Nos concretos estruturais, o adensamento é feito através de vibração, que deve ser feita tomando-se os devidos cuidados para evitar: pontos sem

vibração (que provocarão surgimentos de vazios), segregação do material por meio de vibração exagerada, ou perda de aderência com a armadura. O adensamento do concreto no corpo de prova é feito de forma manual, por procedimentos definidos na NBR 5.738 (ABNT, 1994). O adensamento feito fora desses padrões pode conduzir a resultados errôneos da resistência do concreto à compressão.

### **2.9.2.3 Resistência à tração por compressão diametral**

O ensaio para determinar a resistência à tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos foi desenvolvido por Lobo Carneiro, e no Brasil é regido pela NBR 7.222 (ABNT, 1994). Nesse ensaio, o corpo de prova é posicionado de modo que fique em repouso ao longo de uma geratriz, sobre o prato da máquina de compressão. O contato entre o corpo de prova e os pratos da máquina de ensaio deve dar-se somente ao longo de duas geratrizes diametralmente opostas ao corpo de prova, através de duas tiras de chapa duras de fibra de madeira.

### **2.9.2.4 Absorção e índice de vazios**

A quantidade relativa de vazios num dado volume de agregados é medida pela porosidade ( $n$ ) ou pelo índice de vazios ( $e$ ). O índice de vazios é a relação entre o volume ocupado pelos vazios ( $V_v$ ) e o volume ocupado por toda a amostra de agregados ( $V$ ) (ISAIA, 2010).

A absorção é uma medida de umidade para a amostra com partículas na condição saturada com superfície seca (SSS), ou seja, a absorção mede a quantidade de água que pode preencher os poros comunicantes nos grãos de uma massa de agregados. A absorção é calculada pela Equação 2.2 (ISAIA, 2010).

$$A = \left( \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

A absorção do agregado está diretamente relacionada com a quantidade dos vazios comunicantes ou índice de vazios aparente dos grãos sólidos. Os valores da absorção das rochas ígneas e metamórficas geralmente são inferiores a 0,5%, e raramente excedem 1,0%. Alguns tipos de basaltos são exceções e podem ter alta

absorção. As rochas sedimentares têm maior capacidade de absorção. Agregados lateríticos ou lateritas são altamente porosos e a absorção de água chega facilmente aos 10% (MOIZINHO, 2007).

## **2.10 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS PARA O ESTUDO DA MICROESTRUTURA**

Para compreender as propriedades dos materiais ou desenvolver novos materiais, muitas vezes é necessário examinar os elementos estruturais e os defeitos que influenciam o seu comportamento. O estudo da microestrutura é muito importante, pois contribui para o entendimento das relações existentes entre microestrutura-defeitos-propriedades e permite prever as propriedades dos materiais quando essas relações são estabelecidas (ISAIA, 2010).

A seguir, algumas técnicas experimentais que auxiliam na análise da estrutura interna dos materiais.

### **2.10.1 Espectroscopia por fluorescência de raios X**

A espectroscopia por fluorescência de raios X é uma técnica analítica relativamente simples e, em geral, não destrutiva, usada na determinação qualitativa e quantitativa de elementos que compõem uma amostra. É uma das técnicas analíticas mais utilizadas em geoquímica. A indústria mineral, tanto a de exploração como a de beneficiamento, também utiliza a fluorescência de raios X, principalmente para os controles de processos. As principais aplicações em geoquímica são as determinações de elementos maiores, menores e traços de rochas, solos e sedimentos. Os resultados da FRX são sempre de concentrações elementares totais. A FRX também pode ser útil na análise de amostras mineralizadas, para determinar elementos em concentração anômala.

A fluorescência de raios X dos elementos presentes numa amostra ocorre quando esta é atingida por raios X oriundos de um tubo de raios X. Ao incidirem nos átomos da amostra, esses raios X primários ejetam elétrons das camadas próximas do núcleo. As vacâncias criadas são imediatamente preenchidas por elétrons das camadas mais externas e, ao mesmo tempo, há emissão de raios X, cuja energia corresponde à diferença entre as energias dos níveis e subníveis das transições eletrônicas envolvidas.

### **2.10.2 Difractometria de raios X – DRX**

A técnica de difração de raios X é a técnica de caracterização de materiais mais indicada na determinação das fases cristalinas presentes em matérias. Embora forneça os elementos químicos presentes em uma amostra, a análise química não informa como eles estão ligados, não sendo suficiente para identificar fases polimórficas (ALBERT *et al.*, 2002).

Dessa forma, a difração de raios X é utilizada para se obterem informações sobre a estrutura, composição e estado de materiais policristalinos. No caso de materiais laminares, os difratogramas de raios X permitem determinar a distância interplanar. Entre as vantagens da técnica de difração de raios X para a caracterização de fases, destacam-se: a simplicidade e rapidez do método, a confiabilidade dos resultados (pois o perfil de difração obtido é característico para cada fase cristalina), a possibilidade de análise de materiais compostos por uma mistura de fases e uma análise quantitativa dessas fases (ALBERT *et al.*, 2002).

### **2.10.3 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV**

O microscópio eletrônico de varredura é um equipamento versátil que permite a obtenção de informações estruturais e químicas de amostras diversas. Dependendo do material, a MEV permite alcançar aumentos de até 900.000 vezes, mas, normalmente, o aumento máximo, para obtenção de uma boa imagem, é da ordem de 10.000 vezes (RIMSCHUESSEL; WILLIAMS; THEURER, 1988).

A grande vantagem do MEV é a sua alta resolução, na ordem de 2 a 5 nm – atualmente existem instrumentos com até 1 nm; como também a elevada profundidade do foco (imagem com aparência tridimensional) e a possibilidade de combinar a análise microestrutural com a microanálise química.

A imagem eletrônica de varredura é formada pela incidência de um feixe fino de elétrons de alta energia na superfície da amostra, sob condições de vácuo. Do choque dos elétrons com a amostra, parte do feixe refletido e coletado por detectores que convertem o sinal em imagem de elétrons retroespalhados, elétrons “Auger” ou de elétrons secundários. Ocorre também a emissão de raios X que fornecem a composição química elementar de um ponto ou região da superfície,

possibilitando a identificação de praticamente qualquer elemento presente. A imagem eletrônica de varredura representa, em tons de cinza, o mapeamento e a contagem de elétrons secundários e retroespalhados emitidos pelo material analisado. À medida que o feixe de elétrons primários vai varrendo a amostra, esses sinais vão sofrendo modificações de acordo com a superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução. Já os retroespalhados fornecem imagem característica de variação de composição (ISAIA, 2010).

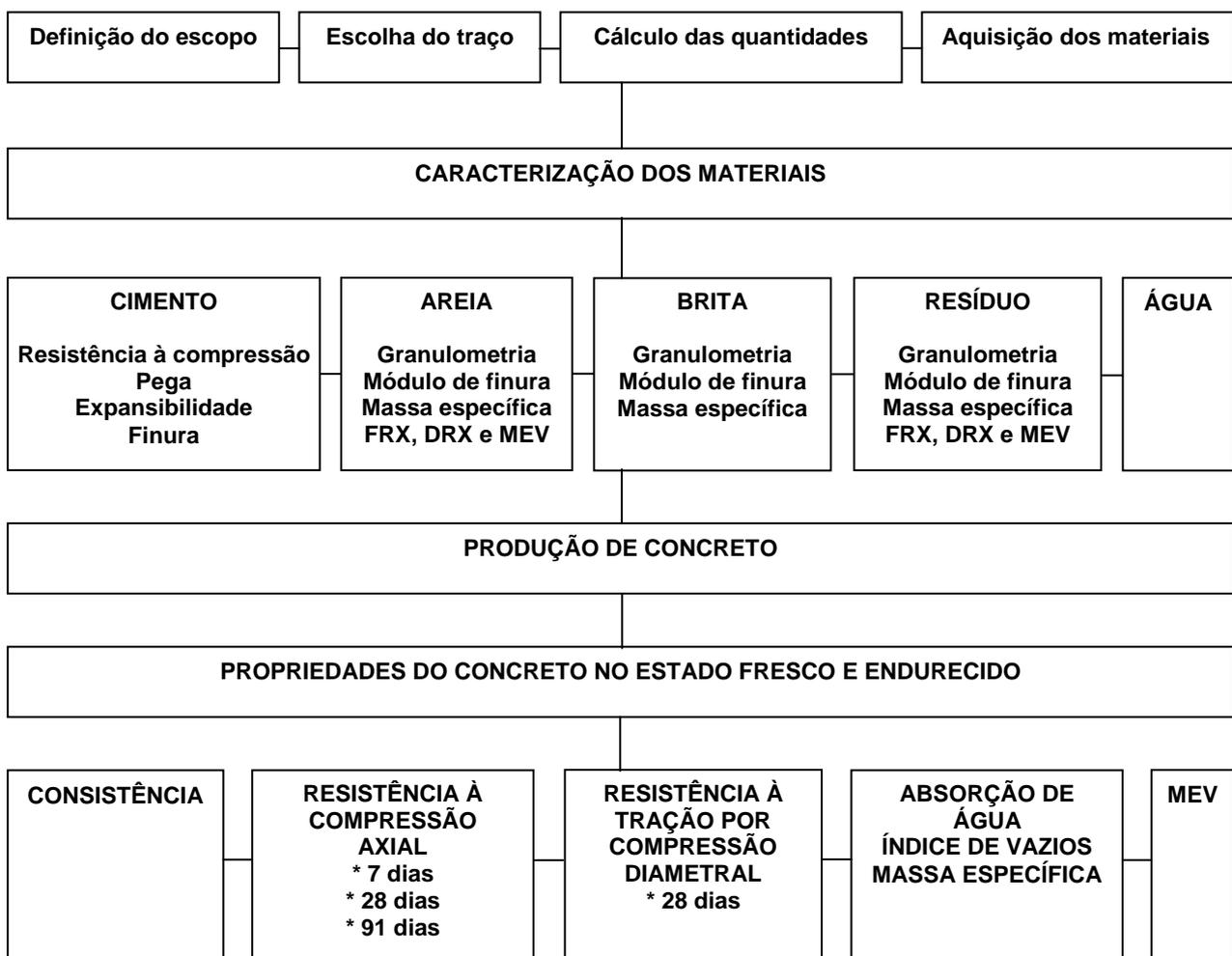
## CAPÍTULO III

# PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, serão apresentados os materiais e métodos utilizados nos ensaios realizados no concreto com resíduo de Scheelita. Todos os ensaios e procedimentos foram baseados nas normas técnicas da ABNT.

As caracterizações dos materiais e as confecções dos corpos de prova dos concretos foram executadas no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL



### 3.1.1 Escolha do traço

Para a escolha do traço foram feitos ensaios preliminares traços com o intuito de definir aquele a ser utilizado, ou seja, definir a proporção dos componentes do concreto, bem como o fator água cimento. Nesses experimentos foram utilizadas proporções de RPS, nas seguintes porcentagens: 0%; 10%; 20%; 30%; e 40%; e o fator água/cimento de 0,55; 0,60; e 0,65. Os ensaios preliminares foram, no estado fresco a consistência, e no estado endurecido a resistência a compressão axial aos 07 e 28 dias.

Após os ensaios preliminares descritos, o traço de referência do concreto utilizado na pesquisa foi definido na proporção em massa de 1:2:3:0,60 (cimento; areia + Scheelita; brita; água/cimento).

Destaca-se que não foi considerada a resistência do concreto para esse traço, visto que a pesquisa parte da incorporação do resíduo ao concreto para um traço padrão como referência. Porém, o traço escolhido foi verificado em um algoritmo, o qual resultou em uma resistência de 25 MPa.

A Tabela 3.1 pode-se observar a nomenclatura e proporções dos materiais, além da relação água/cimento e os percentuais de resíduos da produção de Scheelita.

Tabela 3.1 – Nomenclatura dos traços do concreto com resíduo da produção de Scheelita.

Nomenclatura	Traço	Fator a/c	RPS (%)
TP	1 : 2 : 3	0,60	0%
TR10%	1 : 2 : 3	0,60	10%
TR20%	1 : 2 : 3	0,60	20%
TR30%	1 : 2 : 3	0,60	30%
TR40%	1 : 2 : 3	0,60	40%
TR50%	1 : 2 : 3	0,60	50%
TR60%	1 : 2 : 3	0,60	60%
TR70%	1 : 2 : 3	0,60	70%
TR80%	1 : 2 : 3	0,60	80%
TR90%	1 : 2 : 3	0,60	90%
TR100%	1 : 2 : 3	0,60	100%

Para cada traço, foram confeccionados 16 corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm. Os corpos de prova foram utilizados para realizar os ensaios como pode ser observado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Número de amostras de corpos de prova.

Ensaio	Número de amostras	
Resistência à compressão axial – 7 dias	03	Corpos de prova
Resistência à compressão axial – 28 dias	03	Corpos de prova
Resistência à compressão axial – 91 dias	03	Corpos de prova
Resistência à tração por compressão diametral – 28 dias	03	Corpos de prova
Absorção índice de vazios, e massa específica real	03	Corpos de prova
Análise microscópica (MEV)	01	Corpos de prova
<b>Total</b>	16	Corpos de prova

### 3.1.2 Cálculo dos quantitativos

A partir da definição dos ensaios e do número de corpos de prova, o volume de concreto para cada traço foi definido considerando que o concreto utilizado para o ensaio de consistência não seria descartado, mas sim aproveitado para o preenchimento dos moldes, conforme tabela anterior. Houve o cuidado de homogeneizar o concreto usado para o ensaio de consistência com o restante do concreto para o preenchimento dos corpos de prova.

A Tabela 3.3 apresenta a quantidade, em massa, de material para a confecção dos 176 corpos de prova, dos 11 traços, sendo acrescido o total de cada insumo em 20%, devido à possibilidade de novos ensaios, se porventura houvesse a necessidade. Uma observação importante para o cálculo dos quantitativos é que a quantidade total do agregado miúdo é resultado da soma da quantidade de areia com o resíduo da extração da Scheelita, visto que o objetivo da pesquisa foi avaliar a incorporação do resíduo em substituição da areia.

Tabela 3.3 – Representação dos traços e quantidade de materiais.

Traço	1	2		3	0,6
	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	RPS (Kg)	Brita (Kg)	a/c (Kg)
TP	10	20	0	30	6
TR10%	10	18	2	30	6
TR20%	10	16	4	30	6
TR30%	10	14	6	30	6
TR40%	10	12	8	30	6
TR50%	10	10	10	30	6
TR60%	10	8	12	30	6
TR70%	10	6	14	30	6
TR80%	10	4	16	30	6
TR90%	10	2	18	30	6
TR100%	10	0	20	30	6
Total	110	110	110	330	66
Total com acrécimo 20%	132,00	132,00	132,00	396,00	79,20

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 3.2.1 Cimento

Conforme cálculo dos quantitativos dos materiais, foram adquiridos e utilizados 03 (três) sacos de cimento Portland composto com pozolana da marca *Lafrage*, com a seguinte nomenclatura: Cimento Campeão CP II-Z-32.

O CP II-Z contém adição de material pozolânico que varia de 6% à 14% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade, sendo ideal para obras subterrâneas, principalmente com presença de água, inclusive marítimas. (Fonte: [www.ecivil.net](http://www.ecivil.net))

### **3.2.1.1 Ensaio de finura**

A determinação da finura do cimento Portland é normatizada pela NBR 11.579 (ABNT, 1991). O objetivo é determinar a porcentagem, em massa, de cimento cujas dimensões de grãos são superiores a 75  $\mu\text{m}$  (fração retida).

O procedimento é pesar ( $50 \pm 0,005$ ) g de cimento com a utilização de uma balança, precisão 0,01 g; colocar sobre peneira de 75  $\mu\text{m}$ , a qual deve estar seca, limpa e encaixada no fundo. Os movimentos podem ser manuais ou mecânicos com o objetivo de espalhar todo o material na peneira, sendo descartado aquele que passar por ela. Na execução do peneiramento, deve-se evitar qualquer perda de material. O material retido será então pesado, o qual deverá ser inferior a 12%.

### **3.2.1.2 Ensaio de início de pega**

A determinação do início de pega do cimento Portland é normatizada pela NBR NM 65 (ABNT, 2003). O objetivo é determinar, com o uso da agulha de Vicat, o tempo transcorrido desde a adição da água ao cimento até o momento em que a agulha penetra na pasta até uma distância de  $04 \pm 1$  mm da placa base.

### **3.2.1.3 Ensaio de expansibilidade**

O ensaio de expansibilidade teve como orientação a NBR 11.582 (ABNT, 1991) – Cimento Portland: Determinação da expansibilidade de Le Chatelier (método de ensaio).

O ensaio consiste em confeccionar uma pasta com 500 g de cimento Portland e água necessária para a consistência normal, segundo a NBR NM 43 (ABNT, 2003). Coloca-se a agulha, apoiada pela base do cilindro sobre a placa de vidro lubrificada com óleo mineral, e, com a ajuda de uma espátula fina, passa-se a preenchê-la com a pasta de cimento e água. São moldados 03 (três) corpos de prova, para o ensaio a frio. Para a cura, colocam-se os corpos de prova imersos em água potável por  $20 \pm 4$  horas. Após a cura, as placas de vidros são retiradas e as agulhas de “Le Chatelier” são colocadas no tanque de água, durante seis dias, com as hastes fora da água.

Os afastamentos das extremidades das agulhas são medidos. A expansibilidade a frio é a média da diferença dos afastamentos medidos.

#### **3.2.1.4 Ensaio de resistência à compressão axial do cimento**

Baseado na NBR 7.215 (ABNT, 1997), o ensaio consiste em moldar 04 (quatro) corpos de prova cilíndricos, com dimensões 50 mm x 100 mm, para as idades de 03, 07 e 28 dias. A pasta deve ser confeccionada dentro de um misturador no qual se adiciona toda a quantidade de água e o cimento. No início, o misturador deve estar com velocidade baixa, durante 30 segundos. A areia normal deve ser previamente misturada antes de ser colocada no misturador. Após inserir a areia normal, a velocidade do misturador é alterada para rápida, durante 30 segundos. Em seguida, desliga-se o aparelho por 1 min e 30 s. Após esse tempo, liga-se novamente, por 1 min, na velocidade alta. Ao final, devem-se preencher os moldes em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com o soquete normal. Os corpos de prova devem ser submetidos a um período de cura inicial ao ar e a um período final em água, conforme norma.

### **3.2.2 Areia**

#### **3.2.2.1 Granulometria**

Baseado na NBR NM 248 (ABNT, 2003), o ensaio tem como objetivo classificar as partículas de uma amostra através de seus tamanhos e de suas frações correspondentes a cada tamanho.

Para o ensaio, há a necessidade de secar o agregado em estufa. Em seguida, é pesado, no mínimo, 500 g do agregado, que é colocado na série de peneiras. As frações retidas são pesadas e a partir disso são calculadas as porcentagens, em massa.

Com os resultados, é possível determinar a dimensão máxima ( $D_{máx}$ ) do agregado miúdo como sendo a abertura da malha, em milímetros, da peneira que contém uma porcentagem retida acumulada igual ou inferior a 5%; e o módulo de finura como sendo a soma das porcentagens acumuladas retidas nas peneiras.

As areias são classificadas, segundo a NBR 7.211 (ABNT, 2009), através do seu módulo de finura, da seguinte forma:

- Areia fina – MF < 2,20;
- Areia média – 2,20 < MF < 2,90;
- Areia grossa – MF > 2,90.

### 3.2.2.2 Massa específica real e unitária

Baseado na NBR NM 52 (ABNT, 2009), o ensaio tem como objetivo a determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman.

No ensaio, a massa específica é determinada através da introdução de 200 ml de água e 500 g do agregado no Frasco de Chapman. Em seguida, registra-se o volume final do conjunto, água mais agregado. O resultado é obtido através da Equação 3.1.

$$\rho_{esp} = \left( \frac{M}{L - L_0} \right) \quad (3.1)$$

Onde:

$\rho_{esp}$  → massa específica;

$M$  → massa do agregado;

$L$  → leitura final da escala,  $dm^3$ ;

$L_0$  → leitura da escala do frasco somente com água,  $dm^3$ ;

A massa unitária é a relação da massa do agregado inserido em um recipiente e o volume desse recipiente.

O ensaio é baseado na NBR NM 45 (ABNT, 2006), a qual determina a massa unitária e o volume de vazios do agregado miúdo. O ensaio consiste em preencher o recipiente até que o mesmo transborde, registrando-se a massa do recipiente mais o conteúdo. O resultado é determinado através da Equação 3.2.

$$\rho_{ap} = \left( \frac{M_{ar} - M}{V} \right) \quad (3.2)$$

Onde:

$\rho_{ap}$  → massa unitária;

$M_{ar}$  → massa do recipiente mais agregado, em kg;

$M$  → massa do recipiente, kg;

$V$  → volume do recipiente, em  $dm^3$ ;

### **3.2.2.3 FRX e DRX da areia**

As análises químicas FRX e DRX foram realizadas com amostra da areia a ser utilizada na pesquisa. A amostra foi coletada de parte do material adquirido. A preparação e as análises foram realizadas no Laboratório de Ensaio de Materiais do Centro Tecnológico do Gás e Energias Renováveis – CTGAS-ER.

Para a análise química, o material foi moído, quarteado e analisado pela técnica de Fluorescência de raios X utilizando o equipamento EDX-720 da marca *Shimadzu*. Por limitação do método, somente elementos entre Na (11) e U (92) foram analisados.

Para identificação da mineralogia, o material foi quarteado e parte do pó foi submetida à análise de difração de raios X. O equipamento utilizado foi o XRD-6000 da marca *Shimadzu*.

### **3.2.2.4 MEV das partículas da areia**

Para a realização da microscopia eletrônica de varredura das partículas da areia, o material foi fixado no porta mostra, conforme Figura 3.1, para a realização da análise. O equipamento utilizado foi o modelo EDX-550 da marca *Shimadzu*. As partículas do lado esquerdo do porta amostra são partículas do agregado miúdo, enquanto as partículas da direita são do resíduo da produção da Scheelita, que também foram analisada no mesmo procedimento.

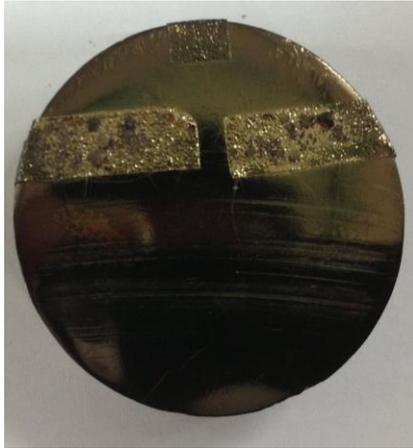


Figura 3.1 – Porta amostra com partículas de areia e Scheelita.

Fonte: acervo pessoal.

### **3.2.3 Brita**

#### **3.2.3.1 Granulometria**

O estudo da distribuição dos diversos tamanhos de grãos numa massa de materiais granulares é chamado de análise granulométrica.

O tamanho dos fragmentos de rocha pode ser medido direta ou indiretamente por meio de ensaios de peneiramento e sedimentação. A medição direta com trena se aplica aos fragmentos individuais maiores que 750 mm. O peneiramento é usado para agregados graúdos e miúdos. A sedimentação é usada para a determinação indireta do tamanho de partículas finas ( $< 0,075$  mm) (ISAIA, 2010).

As peneiras padronizadas têm aberturas quadradas, sendo usadas duas séries: a série normal e a série intermediária. Compõe a série normal as peneiras com aberturas de: 76 mm; 38 mm; 19 mm; 9,5 mm; 4,8 mm; 2,4 mm; 1,2 mm; 0,6 mm; 0,3 mm; e 0,15 mm. As peneiras intermediárias são usadas apenas para auxiliar na elaboração da curva granulométrica e compreendem as aberturas de: 64 mm; 50 mm; 32 mm; 25 mm; 12,5 mm; e 6,2 mm.

#### **3.2.3.2 Massa específica real e unitária**

A massa específica real dos grãos de uma mistura de agregados é fundamental para a dosagem de concretos betuminosos, embora seja de pouco uso em concretos de cimento Portland (ISAIA, 2010).

Uma grandeza mais utilizada é a massa específica aparente dos agregados, também designada de massa unitária na dosagem de concretos. A massa unitária é definida pela relação entre a massa do conjunto de agregados e o volume que ele ocupa, incluindo os todos vazios permeáveis (ISAIA, 2010), conforme Equação 3.3.

$$\gamma_a = \frac{M}{V} \quad (3.3)$$

Em campo, a massa específica aparente dos agregados é determinada pelo método do Frasco de Areia de acordo com a norma ME 092 (DNER, 1994).

### **3.2.4 Resíduo da Produção de Scheelita (RPS)**

Os ensaios realizados para a caracterização do resíduo da produção de Scheelita foram os mesmos realizados para o agregado miúdo, a areia, incluindo até mesmo as análises químicas, devido à necessidade de se conhecer quais materiais estão presentes, bem como os seus percentuais.

#### **3.2.4.1 Granulometria**

As NBR's NM 45 (ABNT, 2006) e NM 52 (ABNT, 2009) foram utilizadas para determinar massa específica real e unitária do resíduo da Scheelita. O procedimento foi semelhante ao item 3.2.2.1.

#### **3.2.4.2 Massa específica real e unitária**

A NBR NM 248 (ABNT, 2003) foi utilizada para determinar a granulometria do resíduo da Scheelita. O procedimento foi semelhante ao item 3.2.2.2.

#### **3.2.4.3 FRX e DRX do resíduo**

As análises químicas FRX e DRX foram realizadas com amostra do resíduo da extração da Scheelita, coletadas de parte do material fornecido pela Mina Brejuí. A preparação e as análises foram realizadas no Laboratório de Processamento Mineral e de Resíduos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN, no campus Natal - Central. O método, para a

determinação da composição química, se deu através do espectrofotômetro por fluorescência de raios X, sendo utilizado o equipamento EDX-720 Shimadzu; enquanto que a caracterização mineralógica foi feita por difração de raios X, sendo utilizado o equipamento XDR.7000 Shimadzu. A amostra foi devidamente homogeneizada, peneirada e sua granulometria reduzida a um tamanho de partícula inferior a 200 *mesh*.

### **3.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO**

#### **3.3.1 Ensaio no concreto**

##### **3.3.1.1 Abatimento do tronco de cone**

A NBR NM 67 (ABNT, 1998) é o método de ensaio definido pela normalização brasileira para determinação da consistência do concreto fresco através do abatimento do tronco de cone. Nos concretos especiais, como, por exemplo, os bombeados, as características para a trabalhabilidade dependerão não só do abatimento, mas também do diâmetro máximo do agregado graúdo, do consumo de cimento e do teor de argamassa.

Os equipamentos necessários para a realização do ensaio são os seguintes:

- Molde metálico com diâmetro da base inferior de 200 mm  $\pm$  2 mm, diâmetro da base superior de 100 mm  $\pm$  2 mm, e altura 300 mm  $\pm$  2 mm;
- Haste de aço, seção circular, com diâmetro 16 mm e comprimento de 600 mm e extremidades arredondadas;
- Placa de base, metálica, para apoio do molde com lados de dimensão não inferior a 500 mm e espessura igual ou superior a 03 mm;
- Régua graduada.

O ensaio consiste em preencher o tronco de cone, previamente umedecido, em 03 camadas iguais, compactando-as com 25 golpes cada camada. Imediatamente após a retirada do molde, mede-se o abatimento do concreto, determinando a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo de prova. A Figura 3.2 representa o ensaio e os equipamentos necessários.

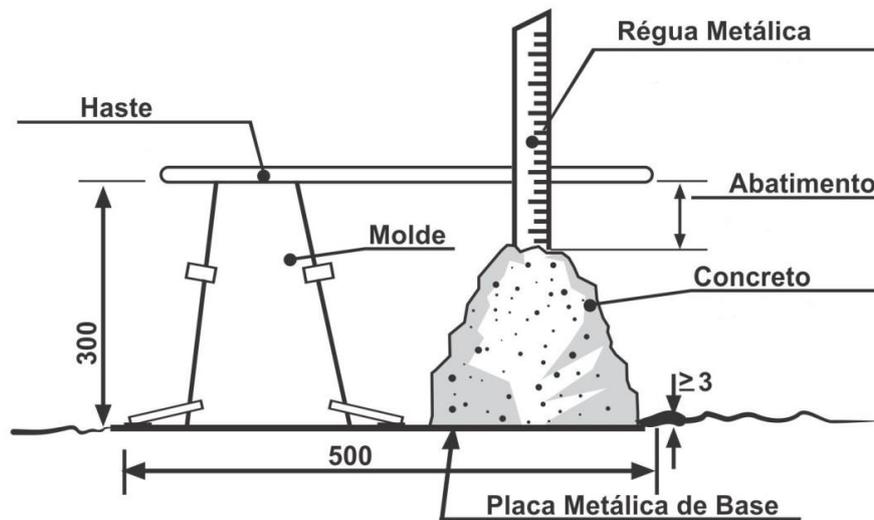


Figura 3.2 – Medida do abatimento, dimensões em mm.

Fonte: ABNT.

### 3.3.1.2 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos foi baseado na NBR 5.739 (ABNT, 1994).

A aparelhagem necessária à execução do ensaio é:

- Equipamento para compressão;
- Sistema de medição de forças;
- Pratos de compressão de formato circular.

Foram moldados 03 (três) corpos de prova para cada idade de 07, 28 e 91 dias, para os 11 (onze) traços, totalizando 99 (noventa e nove) corpos de prova para o ensaio da resistência à compressão axial.

Os corpos de prova foram moldados em cilindros, conforme a norma, com dimensões 100 x 200 mm (diâmetro e altura), e por 24 horas ficaram em repouso. Terminado esse período, foram desmoldados, identificados e permaneceram em cura, imersos em água, conforme NBR 5.738 (ABNT, 1994), até a data do ensaio.

### 3.3.1.3 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova cilíndricos foi baseado na NBR 7.222 (ABNT, 1994). A aparelhagem

necessária à execução do ensaio foi a mesma definida para a execução dos ensaios de resistência à compressão de argamassa e concreto, conforme NBR 7.215 (ABNT, 1997) e NBR 5.739 (ABNT, 1994). Na execução do ensaio, o contato entre o corpo de prova e os pratos da máquina de ensaio deve dar-se somente ao longo de duas geratrizes diametralmente opostas do corpo de prova. Admite-se a adaptação de dispositivos complementares às máquinas cujos pratos apresentem o diâmetro ou a maior dimensão inferior à altura do corpo de prova. A Figura 3.3 apresenta a disposição do corpo de prova para o ensaio.

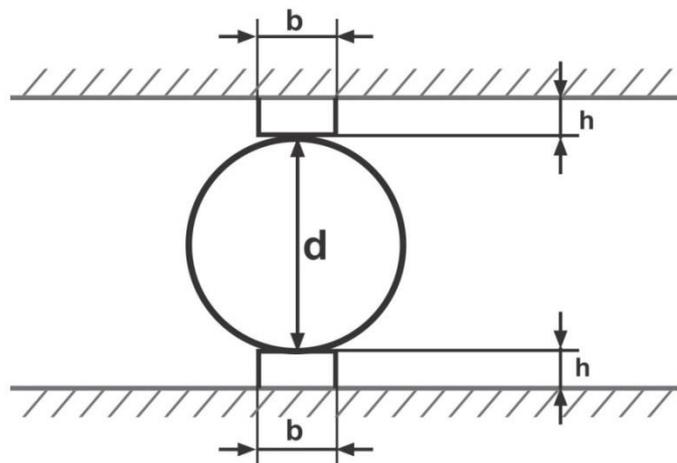


Figura 3.3 – Disposição do corpo de prova para ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Fonte: ABNT

Onde:

$$b = (0,15 \pm 0,01) \times d$$

$$h = (3,5 \pm 0,5) \text{ mm}$$

Ajustam-se os pratos da máquina até que seja obtida uma compressão capaz de manter em posição o corpo de prova. Após esse procedimento, a carga deve ser aplicada continuamente, sem choque, a uma velocidade de  $(0,05 \pm 0,02)$  MPa/s, até a ruptura do corpo de prova.

A resistência à tração por compressão diametral é calculada pela Equação 3.4.

$$f_{LD} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot L} \quad (3.4)$$

Onde:

$f_{LD}$  → resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

$F$  → carga máxima obtida no ensaio, em kN;

$d$  → diâmetro do corpo – de – prova, em mm;

$L$  → altura do corpo – de – prova, em mm;

Foram moldados 03 (três) corpos de prova para o ensaio aos 28 dias, para os 11 (onze) traços, totalizando 33 (trinta e três) corpos de prova. Os corpos de prova foram moldados em cilindros, conforme a norma, com dimensões 100 x 200 mm (diâmetro e altura), e por 24 horas ficaram em repouso. Terminado esse período, foram desmoldados, identificados e permaneceram em cura, imersos em água, conforme NBR 5.738 (ABNT, 1994), até a data do ensaio.

#### 3.3.1.4 Absorção de água e índice de vazios

Os ensaios de absorção de água e índice de vazios foram baseados na NBR 9.778 (ABNT, 1987). O cálculo da absorção (Equação 3.5), do índice de vazios (Equação 3.6) e da massa específica real (Equação 3.7) foi calculado da seguinte forma:

$$A = \left( \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

$$e = \left( \frac{m_{sat} - m_s}{m_s - m_{imersa}} \right) \times 100 \quad (3.6)$$

$$\rho_{real} = \left( \frac{m_s}{m_s - m_{imersa}} \right) \times 100 \quad (3.7)$$

Onde:

$A$  → absorção de água por imersão, em porcentagem;

$e$  → porosidade após saturação em água, em porcentagem;

$\rho_{real}$  → Massa específica real,  $\frac{Kg}{m^3}$ ;

$m_{sat}$  → massa do corpo – de – prova saturado;

$m_s \rightarrow$  massa do corpo – de – prova seco em estufa;

$m_{imerso} \rightarrow$  massa do corpo – de – prova saturado; imerso em água.

As saturações dos corpos de prova foram feitas por imersão em água. Em seguida, após pesagem, os corpos de prova permaneceram em água em ebulição durante 5h.

A aparelhagem necessária para a realização do ensaio é: balança hidrostática sensível a 0,025% da massa das amostras; um recipiente adequado para imersão e fervura das amostras; e estufa com dimensões internas apropriadas para armazenar as amostras à temperatura de  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ .

### 3.3.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

Para a realização da microscopia houve a necessidade de preparação da amostra, que se deu da seguinte forma: os corpos de prova dos traços TP, TR20% e TR80% foram destinados à análise da microestrutura, tendo como referência as letras A, B, e C, respectivamente. Os corpos de prova foram enviados para corte em uma marmoraria, Figura 3.4 e Figura 3.5, devido à necessidade de se utilizar uma serra diamantada. Após dois cortes nos três corpos de prova, obtiveram-se três “bolachas de concreto”, Figura 3.6. Em seguida, para cada uma das “bolachas de concreto”, foram feitos mais dois cortes, resultando em um fragmento com seção de  $2,0 \times 2,0$  cm e com comprimento próximo aos 10,0 cm, para cada traço. A Figura 3.7 mostra as três amostras para os três traços a serem preparados para a micrografia.



Figura 3.4 – Corte dos CP's.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 3.5 – Corte dos CP's.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 3.6 – “Bolachas” dos CP’s.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 3.7 – Amostras dos CP’s.

Fonte: acervo pessoal.

As amostras foram encaminhadas ao laboratório para serem preparadas para a micrografia. O preparo consistia nas seguintes etapas: i) congelamento da amostra com nitrogênio líquido, Figura 3.8 e Figura 3.9; ii) fratura dos amostras congelados Figura 3.10; e iii) metalização das amostras Figura 3.11.



Figura 3.8 – Nitrogênio líquido.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 3.9 – Amostras de concreto congelado.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 3.10 – Fratura das Amostras de concreto.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 3.11 – Amostra de concreto metalizada

Fonte: acervo pessoal.

De posse das três amostras metalizadas, realizou-se a microscopia eletrônica de varredura. Os resultados e discussões encontram-se no Capítulo IV.

## CAPÍTULO IV

# RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados e as discussões acerca da relação do concreto com o traço padrão e os traços com adições de RPS. Inicialmente, foram apresentados os resultados das caracterizações dos materiais utilizados, em seguida, os resultados da caracterização do concreto.

### 4.1 CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 Cimento

##### 4.1.1.1 *Ensaio de início de pega*

A Tabela 4.1 apresenta os resultados do ensaio de início de pega.

Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de início de pega do cimento Portland.

Consistência da pasta		Pega (hora e minuto)	
Água	150 ml	I	09h07
a/c	0,30	T	11h47
		Pega	2h40

De acordo com a NBR NM 65 (ABNT, 2003), a mistura de 150 ml de água com 500 g de cimento teve como resultado para o ensaio de início de pega o tempo de 2 horas e 40 minutos. Sendo esse tempo o resultado adequado à exigência daquela norma, a qual exige um tempo superior a uma hora.

#### **4.1.1.2 Ensaio de expansibilidade**

A mistura de 500 g de cimento e 150 ml de água não apresentou expansibilidade, sendo o resultado desse experimento aceito pela NBR 11.582 (ABNT, 1991), que apresenta como limite máximo de expansibilidade, para o ensaio, 07 mm para a amostra.

#### **4.1.1.3 Ensaio de finura**

O resultado do ensaio de finura para uma amostra de 50 g de cimento foi de 3,60%; ou seja, a quantidade de material retido na peneira nº 200, em massa, foi 1,80 g. De acordo com a norma, esse resultado está dentro do valor exigido, o qual deve ser menor que 12%.

#### **4.1.1.4 Ensaio de resistência à compressão axial**

A Tabela 4.2 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão axial do cimento Portland.

Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial do cimento Portland.

<b>Idade (dias)</b>	<b>Resistência (MPa)</b>
03	17,68
07	21,81
28	31,97

Os resultados apresentados estão dentro do esperado, visto que, segundo a NBR 5.732 (ABNT, 1991), para as idades de 03, 07 e 28 dias, os resultados das resistências à compressão devem ser superiores a 10; 20; e 32 MPa.

### **4.1.2 Areia**

#### **4.1.2.1 Composição granulométrica**

A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos materiais retidos, em massa e porcentagem, para cada peneira utilizada.

Tabela 4.3 – Composição granulométrica do agregado miúdo.

D (mm)	Material retido (g)	Porcentagem (%)	
		Retida	Acumulada
4,8	1,00	0,10	0,10
2,4	16,80	1,68	1,78
1,2	61,80	6,18	7,96
0,6	194,60	19,46	27,42
0,3	483,70	48,37	75,79
0,15	222,30	22,23	98,02
< 0,15	19,80	1,98	100,00
Total	1000,00	-	-

A Figura 4.1 representa o gráfico com a disposição granulométrica do agregado miúdo.

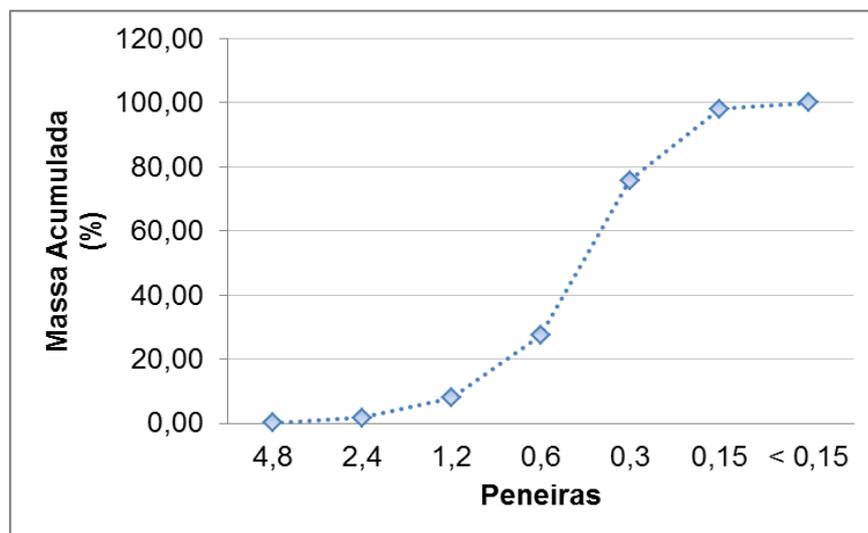


Figura 4.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo.

Com os resultados obtidos, foi determinado o diâmetro máximo e o módulo de finura do agregado miúdo, os quais são: 2,4 mm e 2,11. Com esses resultados, o agregado miúdo é classificado como uma “areia fina”.

#### 4.1.2.2 Massa específica real e massa unitária

A Tabela 4.4 apresenta os resultados dos cálculos para a massa específica real e massa unitária do agregado miúdo.

Tabela 4.4 – Massa específica real e massa unitária da areia.

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
2,631	1,48

#### 4.1.2.3 Fluorescência de raios X da areia

A Tabela 4.5 apresenta o resultado da análise química semiquantitativa em porcentagem de peso em óxido.

Tabela 4.5 – Análise química semiquantitativa da amostra “areia”.

Análise química semiquantitativa da areia		
Substância	Símbolo	Porcentagem (%)
Dióxido de Silício	SiO <sub>2</sub>	69,86
Óxido de Alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,07
Óxido de Sódio	Na <sub>2</sub> O	3,13
Óxido de Potássio	K <sub>2</sub> O	3,12
Óxido de Cálcio	CaO	0,97
Óxido de Ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,48
Dióxido de Enxofre	SO <sub>3</sub>	0,19
Óxido de Bário	BaO	0,12
Óxido de Estrôncio	SrO	0,02
Óxido de Zircônio	ZrO <sub>2</sub>	0,01
Óxido de Rubídio	Rb <sub>2</sub> O	0,01

Fonte: Laboratório de ensaio de materiais (CTGAS-ER).

O Dióxido de Silício e o Óxido de Alumínio representam mais de 90% da amostra.

#### 4.1.2.4 Difractometria de raios X da areia

A Figura 4.2 apresenta o resultado da análise mineralógica com identificação das fases da amostra.

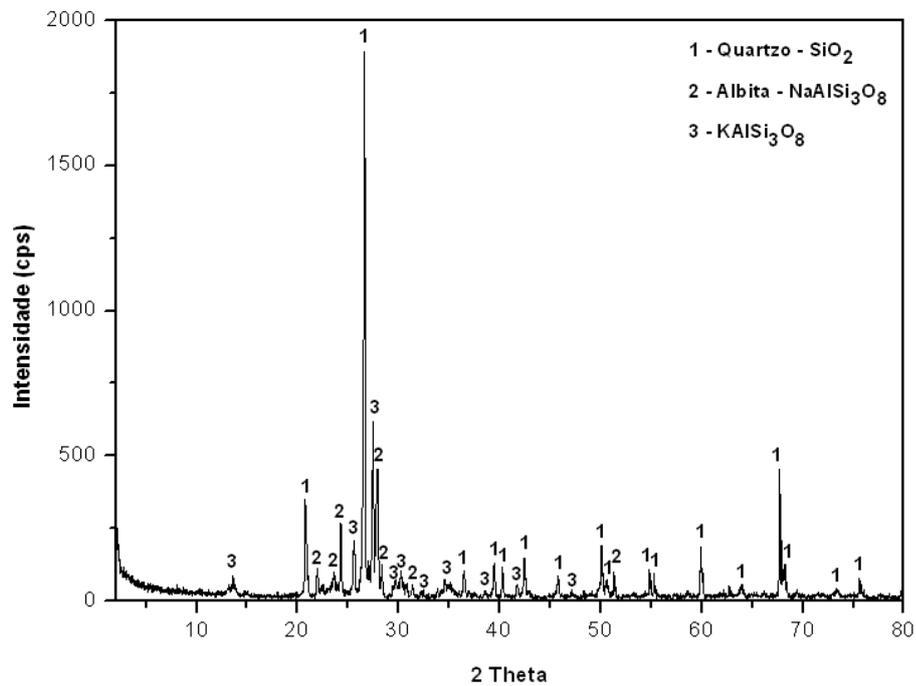


Figura 4.2 – Difractograma representado as fases identificadas na amostra da areia.

Fonte: Laboratório de ensaio de materiais (CTGAS-ER).

#### 4.1.2.5 MEV do agregado miúdo

A Figura 4.3, Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6 apresentam as partículas do agregado miúdo a partir de imagens capturadas na microscopia eletrônico de varredura; as imagens possuem as seguintes aproximações, respectivamente: 50x; 100x; 200x; e 400x.

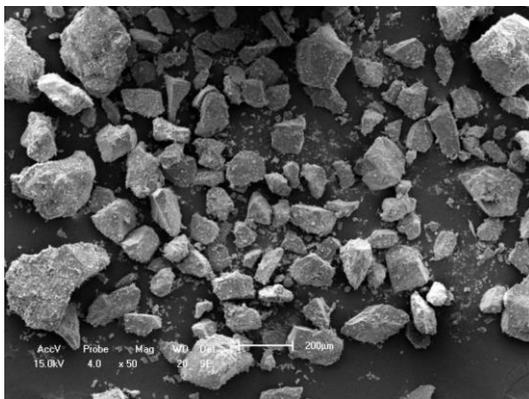


Figura 4.3 – Imagem das partículas da areia (50x).

Fonte: acervo pessoal.

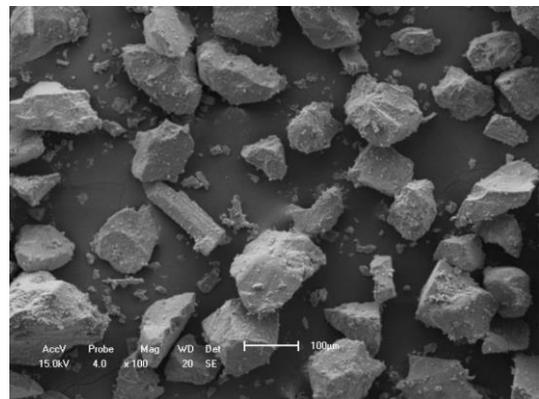


Figura 4.4 – Imagem das partículas da areia (100x).

Fonte: acervo pessoal.

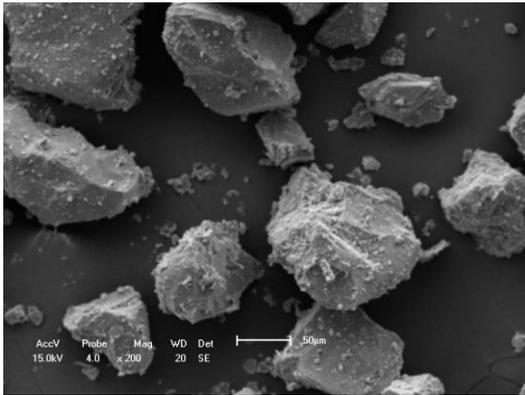


Figura 4.5 – Imagem das partículas da areia (200x).

Fonte: acervo pessoal.

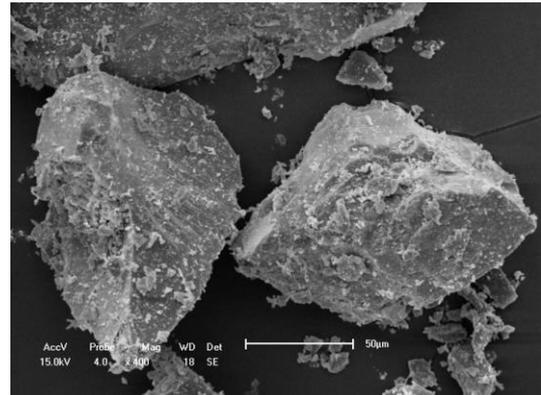


Figura 4.6 – Imagem das partículas da areia (400x).

Fonte: acervo pessoal.

Observa-se nas micrografias das partículas da areia a predominância de formas esféricas, bem como uma estrutura maciça nas partículas. Importante lembrar que a formação destas partículas foi natural.

#### 4.1.3 Brita

##### 4.1.3.1 Composição granulométrica

Na Tabela 4.6 com os resultados da granulometria do agregado graúdo.

Tabela 4.6 – Composição granulométrica do agregado graúdo.

D (mm)	Material retido (g)	Porcentagem (%)	
		Retida	Acumulada
25,4	0,00	0,00	0,00
19,0	733,30	14,67	14,67
12,5	3732,30	74,65	89,32
9,5	474,40	9,48	98,80
6,3	60,00	1,2	100,00
4,8	0,00	0,00	100,00
< 4,8	0,00	0,00	100,00
Total	5000,00	-	-

A Figura 4.7 representa o gráfico com a disposição granulométrica do agregado graúdo.

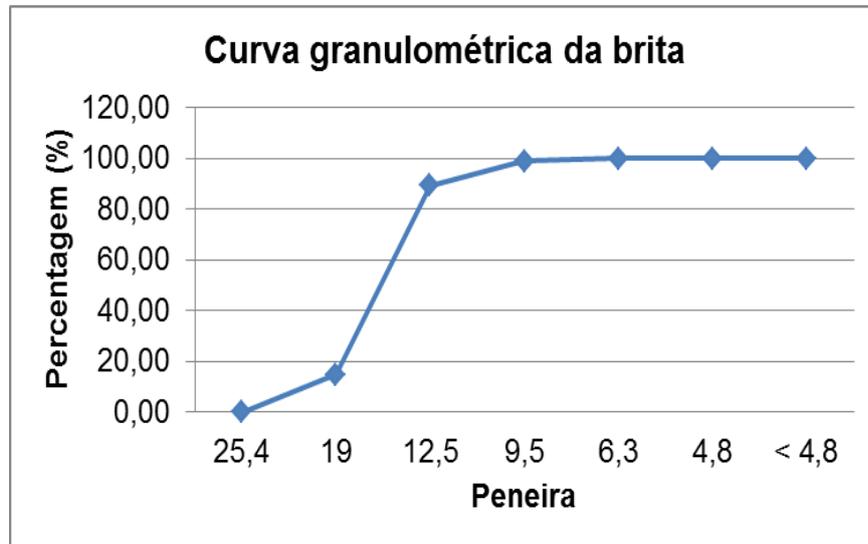


Figura 4.7 – Curva granulométrica do agregado graúdo.

Com a análise da granulometria do agregado graúdo classifica-se este com diâmetro máximo de 25,40 mm e módulo de finura 7,13.

#### 4.1.3.2 Massa específica real e massa unitária

A Tabela 4.7 mostra os resultados dos cálculos para a massa específica real e massa unitária do agregado graúdo.

Tabela 4.7 – Massa específica real e massa unitária da brita.

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
2,655	1,37

Os resultados da massa específica real e massa unitária estão dentro dos valores normalmente utilizados e encontrados na literatura, os quais variam de 2,60 g/cm<sup>3</sup> a 2,70 g/cm<sup>3</sup>; e 1,30 g/cm<sup>3</sup> a 1,75 g/cm<sup>3</sup>; respectivamente.

#### 4.1.4 Resíduo da mineração da Scheelita

##### 4.1.4.1 Composição Granulométrica

A Tabela 4.8 apresenta os resultados da granulometria do resíduo da Scheelita.

Tabela 4.8 – Composição granulométrica do resíduo da produção de Scheelita.

D (mm)	Material retido (g)	Porcentagem (%)	
		Retida	Acumulada
4,8	0,00	0,00	0,00
2,4	0,40	0,04	0,04
1,2	41,00	4,10	4,14
0,6	229,70	22,97	27,11
0,3	348,70	34,87	61,98
0,15	275,80	27,58	89,56
< 0,15	104,40	10,44	100,00
Total	1000,00	-	-

A Figura 4.8 apresenta o gráfico com a disposição granulométrica do resíduo da Scheelita.

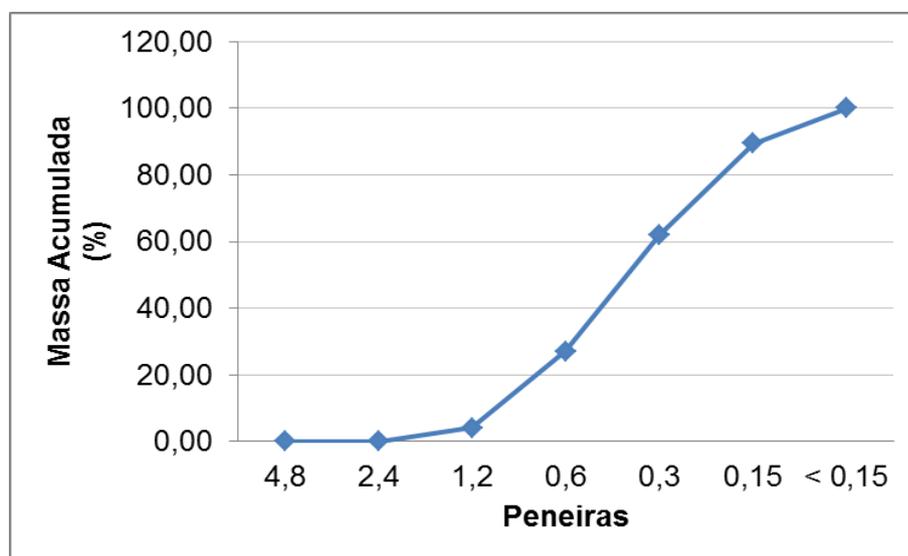


Figura 4.8 – Curva granulométrica do resíduo da produção de Scheelita.

Com os resultados obtidos, foi determinado o diâmetro máximo e o módulo de finura do agregado miúdo, os quais são: 1,2 mm e 1,83. Com esses resultados, o resíduo da produção de Scheelita é classificado como uma “areia fina”.

Comparando as granulometrias da areia e do resíduo da produção da Scheelita, observa-se que o volume dos finos (partículas inferiores a 0,15mm) é maior no resíduo da produção da Scheelita em cinco vezes do que o volume da mesma dimensão na areia.

#### **4.1.4.2 Massa específica real e massa unitária**

A Tabela 4.9 representa os resultados dos cálculos para a massa específica real e a massa unitária do resíduo da Scheelita.

Tabela 4.9 – Massa específica real e massa unitária do resíduo da Scheelita.

<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>
2,89	1,66

Os resultados obtidos para a massa específica real e a massa unitária para o resíduo da produção de Scheelita são maiores em 9,84% e 12,16%, respectivamente, para os valores das massas da areia utilizada nos ensaios, ou seja, é resíduo da produção de Scheelita e um material mais pesado que a areia, mesmo tendo um valor de módulo de finura menor.

#### **4.1.4.3 FRX do resíduo da extração da Scheelita**

A Tabela 4.10 mostra o resultado da análise química do resíduo da extração de Scheelita. A análise foi realizada no Laboratório de Processamento Mineral e de Resíduos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN – Campus Natal - Central.

O resultado apresentou praticamente os mesmos elementos químicos que o estudo de Godeiro (2010) realizado na mina Brejuí, onde foi adquirido o resíduo para esta pesquisa. Apenas os percentuais dos componentes variaram em relação ao total analisado. O Óxido de Cálcio é o elemento com maior percentual presente na composição do resíduo de Scheelita em ambos estudos.

Tabela 4.10 – Análise química semiquantitativa do Resíduo da Produção de Scheelita.

<b>Análise química do R.P.S.</b>		
<b>Substância</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
Óxido de Cálcio	CaO	40,33
Dióxido de Silício	SiO <sub>2</sub>	30,91
Óxido de Ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,59
Óxido de Alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,10
Óxido de Magnésio	MgO	2,29
Dióxido de Titânio	TiO <sub>2</sub>	1,12
Óxido de Potássio	K <sub>2</sub> O	1,05
Óxido de Manganês	MnO	0,97
Dióxido de Enxofre	SO <sub>3</sub>	0,55
Trióxido de Tungstênio	WO <sub>3</sub>	0,53
Óxido de Estrôncio	SrO	0,23
Outros	-	0,33

Fonte: LPMR – IFRN

#### **4.1.4.4 DRX do resíduo da extração da Scheelita**

A Figura 4.9 representa a caracterização mineralógica do resíduo da produção de Scheelita, obtidos a partir da análise por DRX. A análise foi realizada no Laboratório de Processamento Mineral e de Resíduos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN – Campus Natal - Central.

Observando a imagem da análise é possível identificar a predominância da Calcita e do Quartzo, maiores picos, respectivamente. Há ainda a presença dos elementos químicos Albita, Anortita e Biotita.

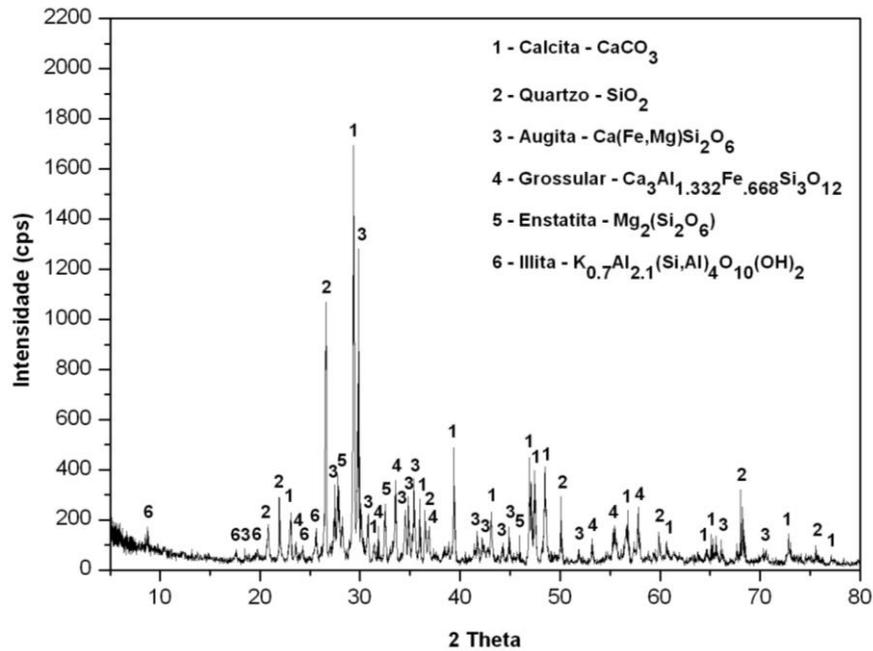


Figura 4.9 – Difratoograma representado as fases identificadas na amostra do resíduo da produção de Scheelita.

Fonte: Laboratório de ensaio de materiais (CTGAS-ER).

#### 4.1.4.5 Análise da microestrutura da partícula do resíduo da produção de Scheelita

A Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13 apresentam as partículas do resíduo da produção de Scheelita a partir de imagens da microscopia eletrônica de varredura; as imagens possuem as seguintes aproximações, respectivamente: 50x; 100x; 150x; e 400x.

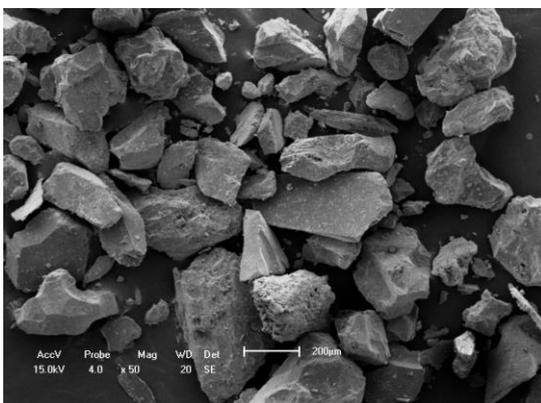


Figura 4.10 – Imagem das partículas do resíduo (50x).

Fonte: acervo pessoal.

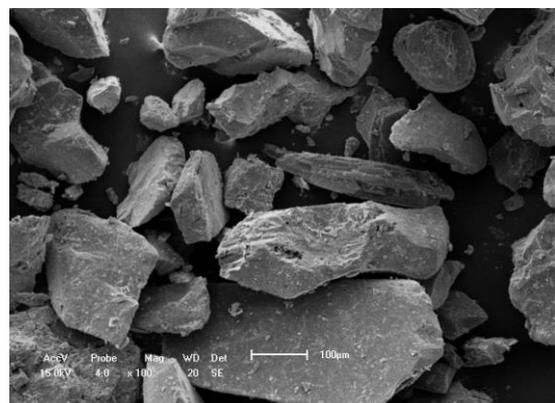


Figura 4.11 – Imagem das partículas do resíduo (100x).

Fonte: acervo pessoal.

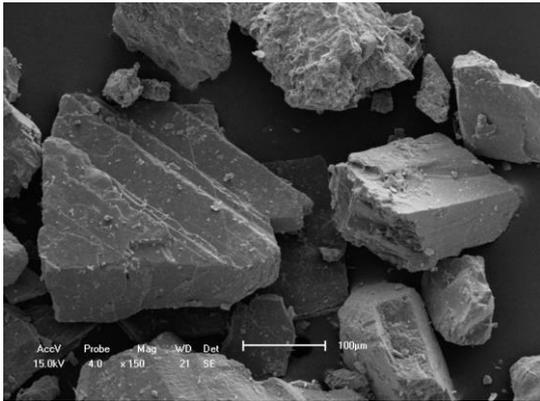


Figura 4.12 – Imagem das partículas do resíduo (150x).

Fonte: acervo pessoal.

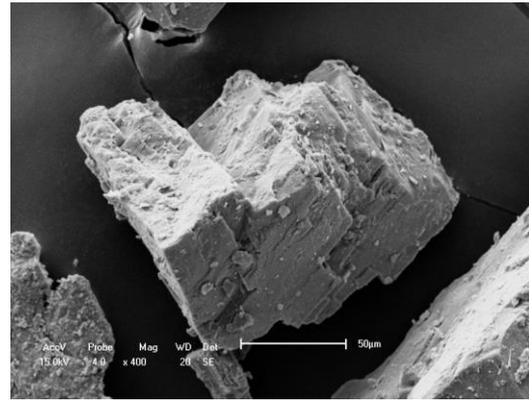


Figura 4.13 – Imagem das partículas do resíduo (400x).

Fonte: acervo pessoal.

Observa-se nas micrografias das partículas do resíduo da produção de Scheelita que as partículas possuem uma formação laminar. As formas das partículas são cubos. Há influência do processo de formação das partículas através da britagem no processo de produção da Scheelita. Na Figura 4.13 observa-se a influência da britagem.

## 4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

### 4.2.1 Ensaio da consistência

Os ensaios de abatimento do tronco de cone foram realizados sempre nos mesmos horários, entre 7h30 e 8h30, e pelos mesmos operadores, com o intuito de se obter os resultados dentro de um mesmo padrão execução. Na realização do ensaio, foi registrada a temperatura do meio ambiente, a qual variou entre 27°C e 30°C, com o intuito de se observar alguma interferência, porém não houve. A Figura 4.14 apresenta os resultados das consistências dos concretos através dos ensaios de abatimento de tronco de cone.

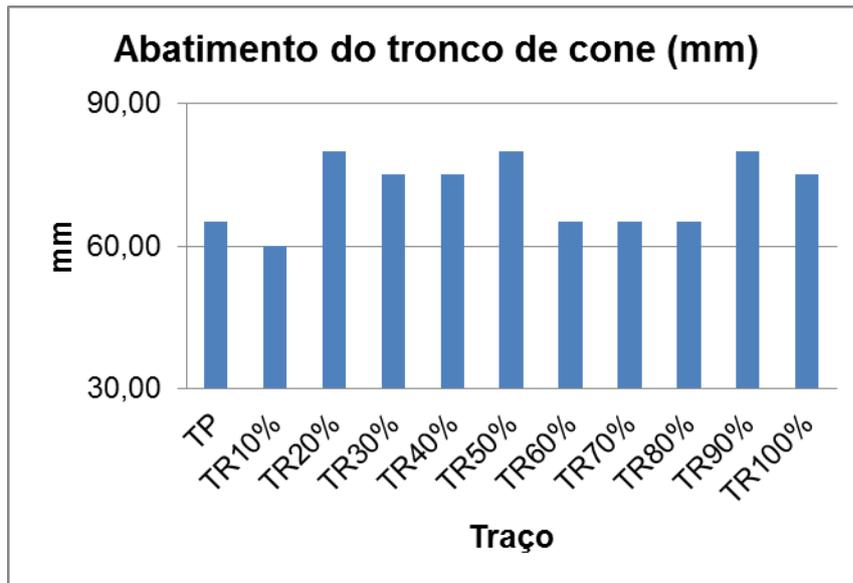


Figura 4.14 – Resultado do ensaio de consistência.

Os resultados do ensaio de consistência tiveram um aumento no abatimento em 60% dos traços, sendo os traços TR20%; TR50% e TR90% os traços de maior abatimento. Em 30% dos traços, o abatimento obteve o mesmo resultado; e em 10% o resultado do abatimento foi inferior, sendo o traço TR10% o de menor abatimento. O desvio padrão foi de 7,44; para os 11 valores encontrados dos 11 traços, ou seja, 10,43% do valor da média.

Analisando os dados, conclui-se que a incorporação do resíduo de Scheelita tornou o concreto mais plástico e fluido, aumentando a trabalhabilidade ou mantendo a consistência do traço de referência. Porém, não houve uma linearidade com o aumento de resíduo incorporado aos traços.

Os valores da Figura 4.14 são considerados de consistência plástica a mole para peças de concreto aparente (60,00 mm até 80,00 mm).

#### 4.2.2 Ensaio da resistência à compressão axial

A Tabela 4.11 com os valores do ensaio da resistência à compressão axial aos 07 dias, incluindo as datas da realização dos ensaios.

Tabela 4.11 – Resultados do ensaio da resistência à compressão axial aos 07 dias.

<b>Traço</b>	<b>Data do ensaio</b>	<b>CP01 (MPa)</b>	<b>CP02 (MPa)</b>	<b>CP03 (MPa)</b>	<b>Média (MPa)</b>
TP	05/mar/13	18,34	18,09	17,83	18,09
TR10%	06/mar/13	16,82	16,05	16,56	16,48
TR20%	11/mar/13	17,96	17,20	17,20	17,45
TR30%	12/mar/13	16,94	16,94	17,45	17,11
TR40%	13/mar/13	16,18	16,43	17,07	16,56
TR50%	14/mar/13	16,56	15,67	16,94	16,39
TR60%	15/mar/13	18,47	17,83	17,45	17,92
TR70%	18/mar/13	17,32	17,20	17,32	17,28
TR80%	19/mar/13	15,80	16,18	15,80	15,92
TR90%	20/mar/13	16,05	16,56	16,05	16,22
TR100%	21/mar/13	16,43	15,80	16,94	16,39

Para o ensaio de resistência à compressão axial, aos 07 dias, todos os traços tiveram o resultado das médias de resistência menor ao traço padrão, ou seja, não houve aumento na resistência do concreto. Porém, o desvio padrão foi de 0,78; para a média dos 33 valores encontrados dos 11 traços, ou seja, 4,59%.

Portanto, os valores encontrados estão dentro de uma dispersão aceitável, conforme *Tabela 01* da NBR 12.655 (ABNT, 1996). Dessa forma os valores estão dentro de um desvio padrão aceitável.

A Figura 4.15 apresenta as médias dos valores do ensaio da resistência à compressão axial aos 07 dias, para os 11 traços.

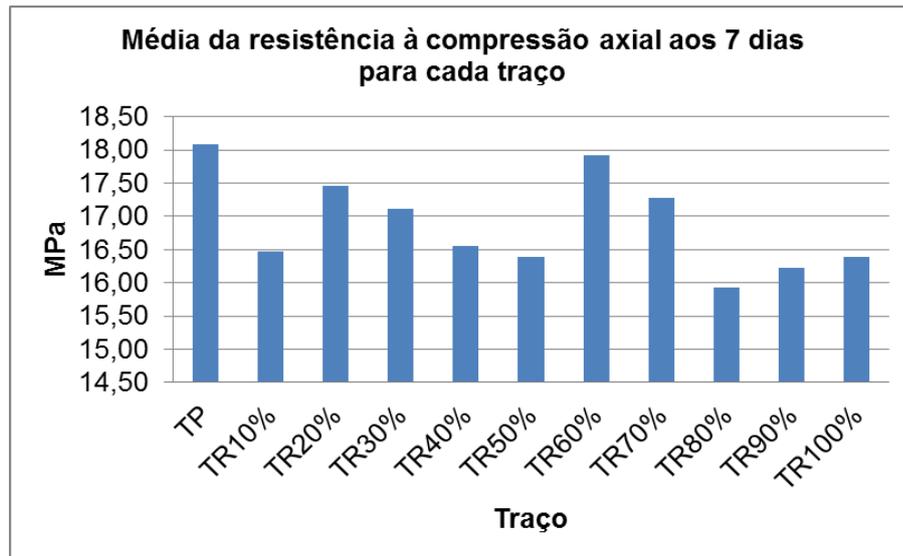


Figura 4.15 – Gráfico com as médias das resistências à compressão axial aos 07 dias.

A Tabela 4.12 apresenta os resultados do ensaio da resistência à compressão axial, aos 28 dias.

Tabela 4.12 – Resultados do ensaio da resistência à compressão axial aos 28 dias.

Traço	Data do ensaio	CP01 (MPa)	CP02 (MPa)	CP03 (MPa)	Média (MPa)
TP	26/março/13	21,78	23,57	23,82	23,06
TR10%	27/março/13	22,68	22,55	22,29	22,51
TR20%	01/abril/13	23,44	23,95	23,18	23,52
TR30%	02/abril/13	22,42	21,40	22,93	22,25
TR40%	03/abril/13	22,29	21,66	21,91	21,95
TR50%	04/abril/13	23,44	22,42	22,17	22,68
TR60%	05/abril/13	23,95	24,08	24,08	24,03
TR70%	08/abril/13	23,57	22,68	22,04	22,76
TR80%	09/abril/13	20,76	21,27	21,15	21,06
TR90%	10/abril/13	21,53	20,13	20,38	20,68
TR100%	11/abril/13	20,00	21,91	19,11	20,34

Para o ensaio de resistência à compressão axial, aos 28 dias, os traços com incorporação de 20% e 60% obtiveram resultados superiores ao do traço padrão, em

2,03% e 4,24%, respectivamente. O desvio padrão foi de 1,28; para os 33 valores encontrados dos 11 traços, ou seja, 5,75% do valor da média. A Figura 4.16 representa a média da resistência à compressão axial aos 28 dias, para os 11 traços.

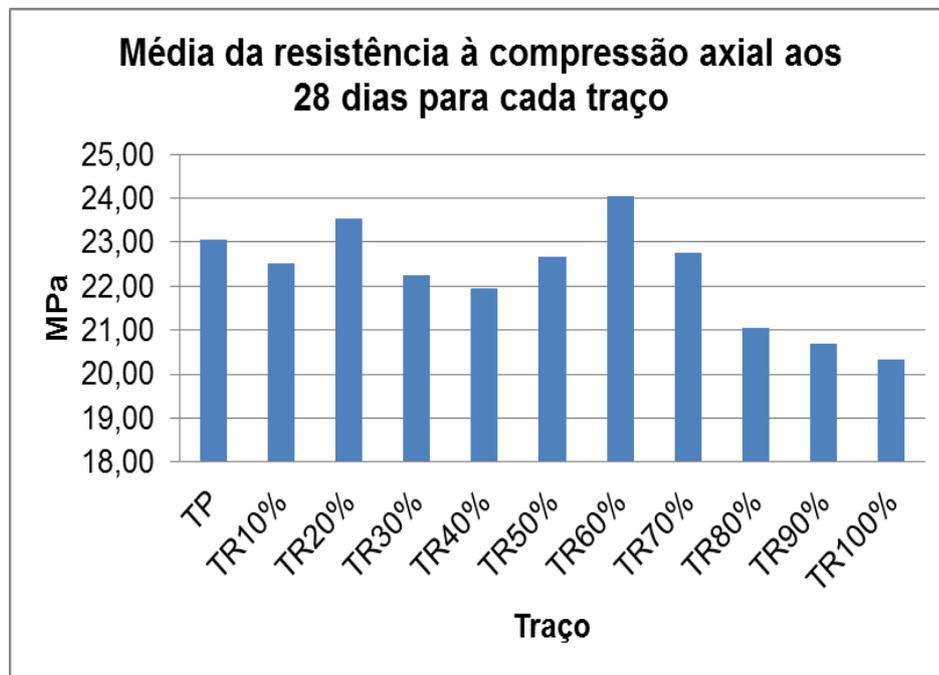


Figura 4.16 – Médias das resistências à compressão axial aos 28 dias.

Comparando os resultados obtidos para as resistências à compressão axial aos 07 e 28 dias, temos que: apesar do desvio padrão, para a idade de 07 dias, ter sido menor que para a idade de 28 dias, observa-se que os resultados das médias para os traços de 20% e 60% foram superiores ao traço de referência.

Vale ressaltar que o cimento utilizado foi o CP II-Z-32 de um mesmo lote de fabricação, pois como todo produto industrializado o cimento também apresenta uma pequena variação em suas características, que podem influenciar na resistência final do concreto.

A Tabela 4.13 apresenta os resultados do ensaio da resistência à compressão axial aos 91 dias.

Tabela 4.13 – Resultados do ensaio da resistência à compressão axial aos 91 dias.

<b>Traço</b>	<b>Data do ensaio</b>	<b>CP01 (MPa)</b>	<b>CP02 (MPa)</b>	<b>CP03 (MPa)</b>	<b>Média (MPa)</b>
TP	28/maio/13	29,43	29,55	28,41	29,13
TR10%	29/maio/13	25,22	25,99	22,93	24,71
TR20%	03/junho/13	24,97	26,11	26,11	25,73
TR30%	04/junho/13	24,59	24,71	26,50	25,27
TR40%	05/junho/13	24,97	25,99	25,48	25,48
TR50%	06/junho/13	25,61	26,75	26,11	26,16
TR60%	07/junho/13	25,73	28,41	26,37	26,84
TR70%	10/junho/13	28,03	25,86	27,39	27,09
TR80%	11/junho/13	24,46	25,86	25,35	25,22
TR90%	12/junho/13	25,48	25,10	25,10	25,22
TR100%	13/junho/13	27,26	26,75	25,48	26,50

Dentre os resultados do ensaio da resistência à compressão axial, aos 91 dias, não houve nenhuma média superior à média do traço padrão. O desvio padrão foi de 1,44; para os 33 valores encontrados dos 11 traços, ou seja, 5,50% da média. Os resultados estão dentro de uma variação aceitável, conforme Tabela 01 da NBR 12.655 (ABNT, 1996).

Em relação ao crescimento da resistência à compressão axial, até a idade de 91 dias, a justificativa está simplesmente no tipo do cimento utilizado, o qual contém adições de material pozolânico, havendo assim um crescimento na resistência até idades próximas aos 90 dias.

A aceitação e o uso desse tipo de cimento vêm se intensificando nos últimos anos e nos dias atuais, 64% de todo o cimento consumido no Brasil é do tipo composto, seja ele E (escória), F (Fíler) ou Z (Pozolana). (Fonte: cimento.org).

A Figura 4.17 representa a média dos resultados dos ensaios da resistência à compressão axial aos 91 dias.

Nos ensaios realizados, os valores médios das resistências à compressão axial, para 91 dias, obtiveram um aumento médio de 17,56% em relação aos

resultados da resistência à compressão axial aos 28 dias, sendo que para o traço padrão esse aumento foi de 26,32%.

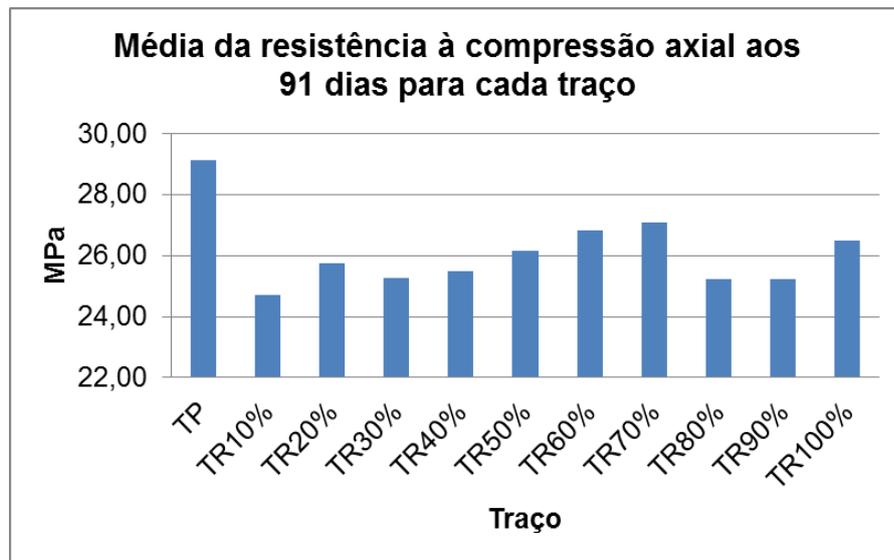


Figura 4.17 – Médias das resistências à compressão axial aos 91 dias.

#### 4.2.3 Ensaio da resistência à tração por compressão diametral

A Tabela 4.14 apresenta os valores do ensaio da resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, incluindo as datas da realização dos ensaios.

**Tabela 4.14** – Resultados do ensaio da resistência à tração.

Traço	Data do ensaio	CP01 (MPa)	CP02 (MPa)	CP03 (MPa)	Média (MPa)
TP	26/março/13	2,42	2,67	2,55	2,55
TR10%	27/março/13	2,48	2,39	2,13	2,33
TR20%	01/abril/13	2,67	2,55	2,55	2,59
TR30%	02/abril/13	2,20	2,45	2,39	2,34
TR40%	03/abril/13	2,10	2,48	2,55	2,38
TR50%	04/abril/13	1,97	2,32	2,64	2,31
TR60%	05/abril/13	2,77	2,01	2,13	2,30
TR70%	08/abril/13	2,42	2,04	2,42	2,29
TR80%	09/abril/13	2,13	2,39	2,16	2,23
TR90%	10/abril/13	2,16	2,16	2,39	2,24
TR100%	11/abril/13	2,13	2,64	2,61	2,46

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, o único traço que obteve resultado superior ao traço padrão foi o traço com incorporação de 20% de resíduo.

O resultado foi 1,67% superior ao traço padrão. O desvio padrão foi de 0,22; para os 33 valores encontrados dos 11 traços, ou seja, 9,37% da média. A Figura 4.18 apresenta a média dos resultados dos ensaios da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, para os traços pesquisados.

Fazendo um comparativo entre as resistências por compressão axial e a tração por compressão diametral, tem-se que a média das relações para cada traço foi de 10,65%, ou seja, cerca de 10% do valor da resistência à compressão representa o valor da resistência à tração para o concreto.

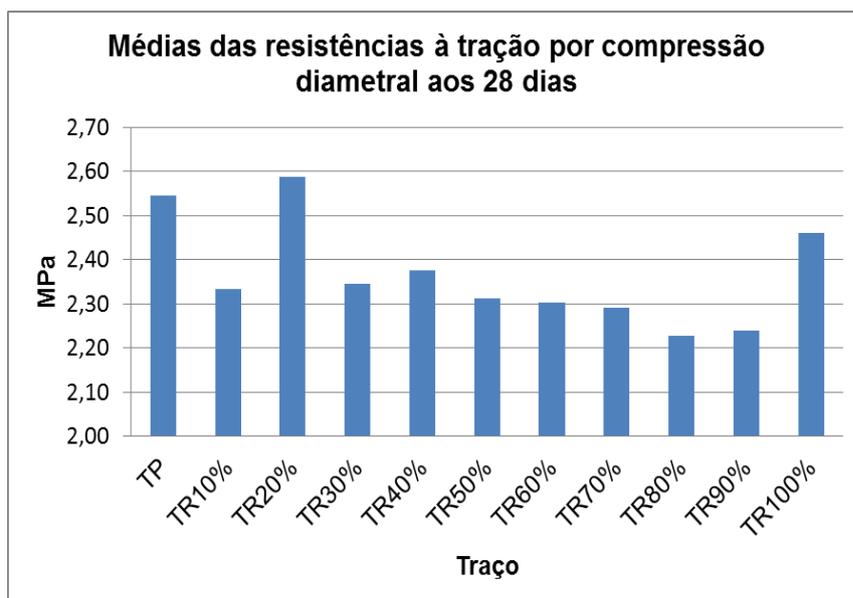


Figura 4.18 – Médias das resistências à tração por compressão diametral.

#### 4.2.4 Ensaio de índice de vazios

A Tabela 4.15 apresenta os valores obtidos no ensaio de índice de vazios para os traços com resíduos.

Tabela 4.15 – Resultados do ensaio de índice de vazios.

Traço	CP01(%)	CP02 (%)	CP03 (%)	Média
TP	11,97	12,89	12,85	12,57
TR10%	11,99	12,13	12,2	12,11
TR20%	14,05	13,84	14,26	14,05
TR30%	13,06	13,92	13,62	13,53
TR40%	13,26	13,53	13,71	13,50
TR50%	12,47	12,32	12,31	12,37
TR60%	14,31	14,81	14,1	14,41
TR70%	14,87	18,25	15,31	16,14
TR80%	14,19	14,04	14,13	14,12
TR90%	14,02	13,5	13,49	13,67
TR100%	14,81	14,8	14,49	14,70

Para o ensaio de índice de vazios, apenas dois traços obtiveram resultados melhores ao traço padrão. As porcentagens de incorporação foram os traços de 10% e 50%. Os resultados foram 3,65% e 1,61% inferiores ao do traço padrão, respectivamente. O desvio padrão foi de 1,21; ou seja, 8,84% da média. A Figura 4.19 representa a média dos índices de vazios, em porcentagem, para cada traço.

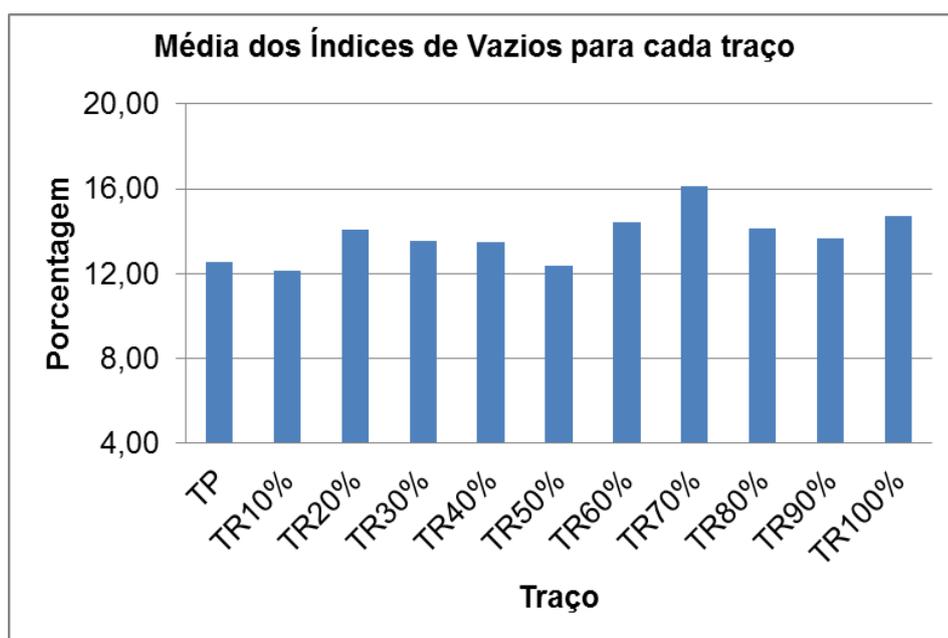


Figura 4.19 – Médias dos resultados dos índices de vazios.

#### 4.2.5 Ensaio de absorção

A Tabela 4.16 apresenta os valores obtidos do ensaio de absorção para os traços com resíduos.

Tabela 4.16 – Resultados do ensaio de absorção por água.

Traço	CP01 (%)	CP02 (%)	CP03 (%)	Média
TP	5,33	5,8	5,77	5,63
TR10%	5,33	5,4	5,44	5,39
TR20%	6,29	6,19	6,39	6,29
TR30%	5,78	6,22	6,07	6,02
TR40%	5,91	6,03	6,13	6,02
TR50%	5,5	5,44	5,43	5,46
TR60%	6,37	6,6	6,26	6,41
TR70%	6,61	8,44	6,82	7,29
TR80%	6,26	6,15	6,23	6,21
TR90%	6,17	5,92	5,92	6,00
TR100%	6,51	6,52	6,25	6,43

Para o ensaio de absorção apenas dois traços obtiveram resultados melhores ao traço padrão. As porcentagens de incorporação foram os traços de 10% e 50%; com os resultados de 4,39% e 3,22% inferiores ao do traço padrão, respectivamente. O desvio padrão foi de 0,53; ou seja, 9,42% da média.

A Figura 4.20 representa a média dos índices de vazios, em porcentagem, para cada traço.

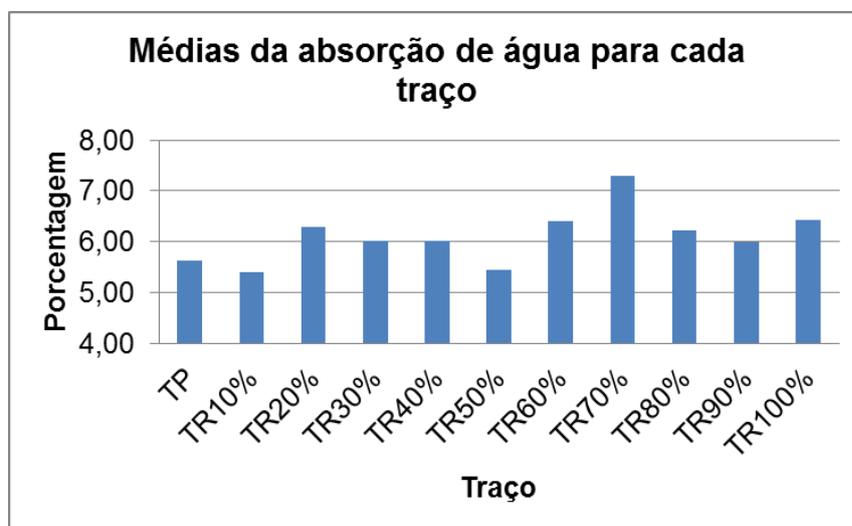


Figura 4.20 – Médias das absorções por água cada traço.

Pede-se considerar que a incorporação do resíduo da produção de Scheelita contribuiu com a diminuição da absorção de água pelo concreto. Esta influência está relacionada com o preenchimento dos vazios pelos pela porcentagem mais fina do resíduo. A não linearidade da propriedade está relacionada com as características e proporções dos agregados utilizados. Há de ressaltar que esta propriedade, a absorção por água, está diretamente ligada à durabilidade do concreto, ou seja, o uso do resíduo como agregado ao concreto contribuiu com capacidade de resistir às influencias ambientais.

#### 4.2.6 Ensaio de massa específica

A Tabela 4.17 apresenta os valores obtidos no ensaio de massa específica para os traços com resíduos. A Figura 4.21 apresenta as médias das massas específicas para os traços com resíduo da extração da Scheelita.

Tabela 4.17 – Resultados do ensaio de massa específica.

<b>Traço</b>	<b>CP01 (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>CP02 (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>CP03 (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Média (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
TP	2260	2228	2232	2240
TR10%	2238	2250	2242	2243
TR20%	2220	2226	2211	2219
TR30%	2256	2238	2223	2239
TR40%	2233	2231	2219	2228
TR50%	2247	2255	2275	2259
TR60%	2244	2252	2233	2243
TR70%	2229	2225	2229	2228
TR80%	2269	2285	2262	2272
TR90%	2240	2284	2275	2266
TR100%	2262	2246	2261	2256

Para o ensaio de massa específica, os resultados apresentaram o traço TR20% como sendo o concreto mais leve e o traço TR80% como sendo o concreto mais pesado. Era de se esperar que o concreto mais pesado fosse o que tivesse a

maior porcentagem de resíduo, devido a densidade do resíduo ser maior que a da areia, mas não ocorreu. O desvio padrão foi de 19,18; ou seja, 0,85% da média.

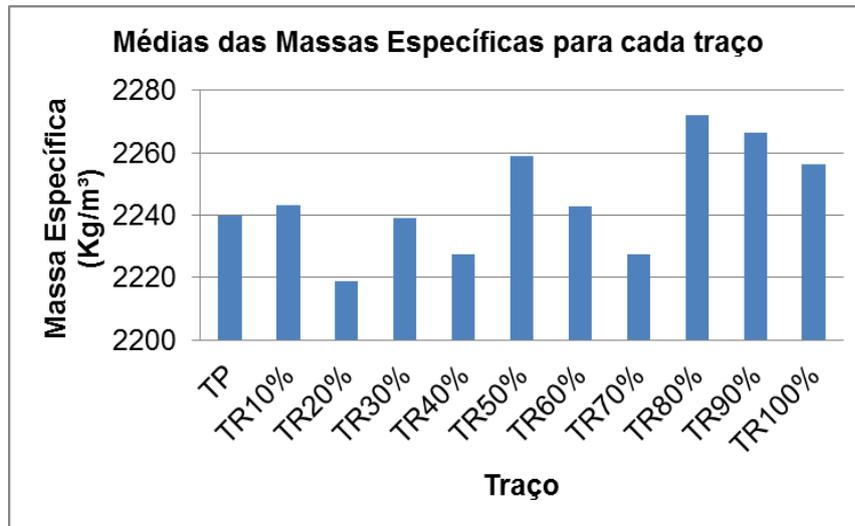


Figura 4.21 – Médias das massas específicas dos concretos.

Comparando as Figuras 4.20 e 4.21 observa-se que não há uma correlação entre as propriedades, visto que o TR80% é o traço com maior valor de massa específica, mas a absorção não é o de menor valor, e sim o traço TR10%, e que a média da massa específica está entre os de menores valores.

#### 4.2.7 Análise da microestrutura do concreto

A Figura 4.22, Figura 4.24, e Figura 4.26 são imagens com aproximação de 1000x, da zona de transição. A Figura 4.23, Figura 4.25 e Figura 4.27 são imagens com aproximação de 3000x da matriz, para cada traço da análise.

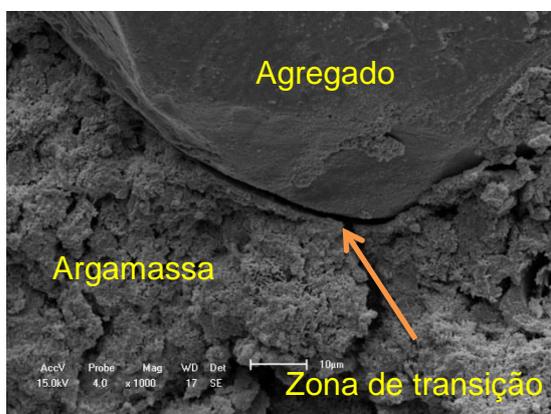


Figura 4.22 – Zona de transição TP.

Fonte: acervo pessoal.

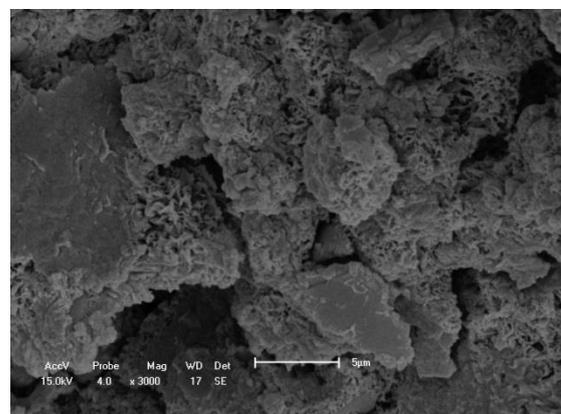


Figura 4.23 – Matriz do TP.

Fonte: acervo pessoal.



Figura 4.24 – Zona de transição entre agregado e argamassa do TR20%.

Fonte: acervo pessoal.

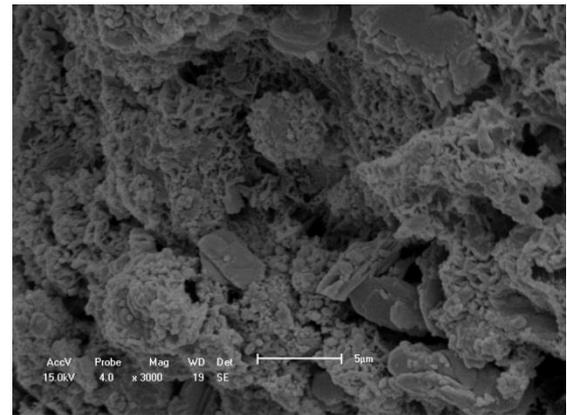


Figura 4.25 – Matriz do TR20%.

Fonte: acervo pessoal.

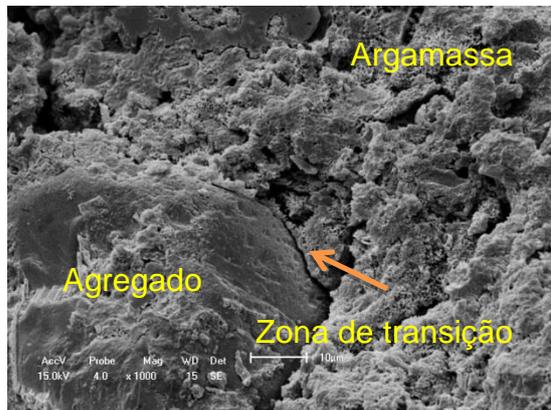


Figura 4.26 – Zona de transição entre agregado e argamassa do TR80%.

Fonte: acervo pessoal.

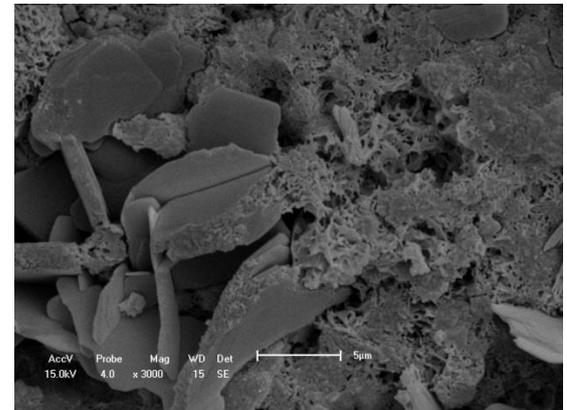


Figura 4.27 – Matriz do TR80%.

Fonte: acervo pessoal.

As imagens apresentadas mostram a disposição das partículas do resíduo da produção de Scheelita. As partículas da areia possuem um formato mais homogêneo, no caso, esférico, tornando a pasta mais homogênea, o que resulta em uma maior interação entre as partículas, enquanto que as partículas do rejeito da produção de Scheelita possuem um formato retangular e que não contribuem para a homogeneidade da pasta, surgindo alguns vazios, como observado na Figura 4.27.

#### 4.2.8 Análise de custo do m<sup>3</sup> de concreto com resíduo.

Para o cálculo do custo de 1m<sup>3</sup> foram utilizados os preços da tabela de insumos, sem desoneração, do sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil - mês de julho de 2013, para o estado do Rio Grande do Norte, descritos na Tabela 4.18. Para o valor da água será adotado R\$ 18,00 por metro cúbico, pois há variação na tarifa conforme o volume de consumo e o local de consumo – comercial, pública, residencial ou industrial.

**Tabela 4.18** – Valores dos insumos para o concreto de cimento Portland.

Código SINAPI	Insumo	Valor	Unidade
1379	Cimento	R\$ 0,44	Kg
370	Areia	R\$ 37,00	m <sup>3</sup>
4718	Brita	R\$ 80,00	m <sup>3</sup>

Fonte: www.caixa.gov.br

Sabemos que:  $V_{concreto} = V_{cimento} + V_{areia} + V_{brita} + V_{água}$ .

Como  $\rho = \frac{m}{Vol}$ , temos que:  $V_{concreto} = \frac{m_{cimento}}{\rho_{cimento}} + \frac{m_{areia}}{\rho_{areia}} + \frac{m_{brita}}{\rho_{brita}} + \frac{m_{água}}{\rho_{água}}$ .

Sendo o traço padrão 1 : 2 : 3 : 0,6; em massa, e substituindo por suas respectivas massas específicas, temos então que:

$$1m^3 = \frac{1x}{3.150} + \frac{2x}{2.631} + \frac{3x}{2.655} + \frac{0,60x}{1.000} \therefore$$

$$1m^3 = 3,175 \times 10^{-4}x + 7,602 \times 10^{-4}x + 11,300 \times 10^{-4}x + 6,00 \times 10^{-4}x \therefore$$

$$1m^3 = 28,077 \times 10^{-4}x \therefore$$

$$x = \frac{1}{28,077 \times 10^{-4}} \rightarrow x = 356,16Kg$$

A Tabela 4.19 apresenta as quantidades dos materiais, em massa, necessários para se produzir 1m<sup>3</sup> de concreto para o traço padrão.

Tabela 4.19 – Quantidade de materiais, em massa, para produção de 1m<sup>3</sup> de concreto para o traço padrão.

Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita (Kg)	Água (Kg)
356,16	712,32	1068,48	213,70

Dividindo as quantidades dos agregados por suas respectivas massas unitárias, temos a Tabela 4.20 com os volumes necessários para se produzir 1m<sup>3</sup> de concreto para o traço padrão.

Tabela 4.20 – Quantidade de agregados, em volume, para produção de 1m<sup>3</sup> de concreto para o traço padrão.

Cimento (Kg)	Areia (Lt)	Brita (Lt)	Água (Lt)
356,16	481,30	779,91	213,70

A Tabela 4.21 apresenta os custos dos insumos para se produzir 1m<sup>3</sup> de concreto para o traço padrão..

Tabela 4.21 – Valores dos insumos para confecção de 1m<sup>3</sup> de concreto para o traço padrão.

Cimento	Areia	Brita	Água
R\$ 156,01	R\$ 17,81	R\$ 62,39	R\$ 3,85

Dessa forma, 1m<sup>3</sup> do traço padrão custa R\$ 240,06 (duzentos e quarenta reais e seis centavos).

Considerando o TR60% como sendo o traço com melhor desempenho, as quantidades necessárias para confeccionar 1m<sup>3</sup> encontram-se na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 – Quantidade de materiais, em massa, para produção de 1m<sup>3</sup> de concreto para o traço TR60%.

Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Resíduo (Kg)	Brita (Kg)	Água (Kg)
356,16	284,92	427,40	1068,48	213,70

A Tabela 4.23 apresenta as quantidades dos agregados, em volume, para a produção de 1m<sup>3</sup> de concreto para o traço TR60%.

Tabela 4.23 – Quantidade de materiais, em volume, para produção de 1m<sup>3</sup> de concreto para o traço TR60%.

Cimento (Kg)	Areia (Lt)	Resíduo (Lt)	Brita (Lt)	Água (Lt)
356,16	192,51	257,47	779,91	213,70

A Tabela 4.24 apresenta os custos dos insumos para se produzir 1m<sup>3</sup> de concreto para o traço TR60%..

Tabela 4.24 – Valores dos insumos para confecção de 1m<sup>3</sup> de concreto para o traço TR60%.

Cimento (Kg)	Areia (Lt)	Resíduo (Lt)	Brita (Lt)	Água (Lt)
R\$ 156,01	R\$ 7,12	R\$ 0,00	R\$ 62,40	R\$ 3,85

Portanto, o custo para se produzir 1m<sup>3</sup> de concreto para o traço TR60% é R\$ 229,38 (duzentos e vinte nove reais e trinta e oito centavos). Esse valor representa um desconto de 4,45% em relação ao custo para produção de concreto para o traço padrão. Porém, com a existência de perda 3% no volume de concreto devido às características físicas do resíduo da produção de Scheelita, a economia real é 1,45%. Não foi considerado perdas nos cálculos para os custos de produção dos concretos de traço padrão e com a incorporação de 60% de resíduo.

## CAPÍTULO V

# CONCLUSÕES

As conclusões principais obtidas no Programa Experimental e as sugestões para trabalhos futuros estão apresentadas neste capítulo.

O objetivo principal e pioneiro desta pesquisa científica foi avaliar a utilização do resíduo da indústria de mineração da Scheelita, com o intuito de se criar um destino sustentável ao resíduo. Vale ressaltar que os resultados obtidos referem-se às condições específicas dos experimentos desenvolvidos, não devendo ser considerados de forma absoluta, sendo indicada a realização de pesquisas complementares para confirmar o desempenho do resíduo da produção da Scheelita.

As principais conclusões da incorporação do resíduo da Scheelita à composição do concreto de cimento Portland foram:

- A utilização do resíduo influenciou a consistência da pasta de forma positiva, ou seja, tornando-a com maior fluidez. Isso ocorreu devido ao resíduo ter uma maior densidade e ser um material mais fino;
- A absorção e o índice de vazios tiveram resultados compatíveis com o de referência, para os traços TR10% e TR50%, os quais contribuem para uma melhor durabilidade do concreto, devido ao resíduo contribuir com a diminuição de ataques externos ao concreto pelo fechamento dos poros;
- Devido à utilização do cimento Portland composto com pozolana, os concretos produzidos tiveram uma evolução na resistência à compressão axial até a idade de 91 dias;
- Todas as medidas de dispersão tiveram resultados satisfatórios, principalmente para os ensaios de resistências, tanto a compressão axial quanto a tração por compressão diametral, com valores dos desvios padrão menores que 6% da média; apresentando assim um bom desempenho para o uso do resíduo da produção de Scheelita como agregado ao concreto de cimento Portland;

- O traço com a incorporação de 60% do resíduo da produção de Scheelita foi o que obteve os melhores resultados. O custo do m<sup>3</sup> do concreto com o traço TR60% produz uma economia de 1,5% no valor do m<sup>3</sup> do concreto com o traço de referência TP, tendo como referência valores de insumos do período deste estudo;
- Conclui-se que a substituição do agregado miúdo, a areia natural, pelo resíduo da produção de Scheelita, à composição do concreto de cimento Portland, é viável; apresentando assim uma destinação correta e sustentável para o novo agregado.
- Importante ressaltar que devido ao pioneirismo desta pesquisa há a necessidade de novas pesquisas com o intuito de se obter um melhor desempenho do novo agregado.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando a importância do tema em relação ao meio ambiente, a sustentabilidade e à escassez de agregados naturais, sugere-se:

- Pesquisar a utilização de novas porcentagens de resíduos de Scheelita próximas às porcentagens que apresentaram resultados de absorção e índice de vazios melhores que o traço padrão. Como exemplo: 15% e 25%;
- Pesquisar a utilização de novos traços de concreto com a incorporação de resíduo da produção de Scheelita;
- Avaliar a influência de aditivos superplastificantes na massa do concreto com resíduo de Scheelita;
- Investigar o comportamento de argamassa com incorporação de resíduo de Scheelita;
- Pesquisar a incorporação do resíduo da produção de Scheelita ao concreto de cimento Portland excluindo as peneiras de menor granulometria.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Manual de ensaios de agregados, concreto fresco, concreto endurecido**. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 1998. 116p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Ensaio de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7412**: Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (n° 200) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43**: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do 8 de cone. Rio de Janeiro, 1998.

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

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. São Paulo: Blucher, 2011. 141 p.

ALBERT, A. P. F. *et al.* **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X**. São Paulo; Cerâmica, 2002.

ALBUQUERQUE, Maria C. F.; GONÇALVES, Aparecido C. Estudo mecânico do concreto de alto desempenho com agregado reciclado. **Holos Environment**, v. 10, ed. 2, p. 153, 2010. ISSN: 1519-8634. Disponível em: <[qualis.capes.gov.br/webqualis/ConsultaPeriodicos.face](http://qualis.capes.gov.br/webqualis/ConsultaPeriodicos.face)>. Acesso em: 27 nov. 2012.

ANDRADE, M. C. **Mineração no nordeste: depoimentos e experiências**. Brasília: CNPq, Assessoria Editorial e Divulgação Científica, 1987.

AVELINO, Veruska K. G. R. **Estudo do comportamento no estado fresco e endurecido do concreto com incorporação de resíduo de corte de botão**. (Dissertação) Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2011. 110f.

BETAT, E. F.; PEREIRA, F. M.; VERNEY, J. C. K. Concretos produzidos com resíduos do beneficiamento de ágata: avaliação da resistência à compressão e do consumo de cimento. **Revista Matéria**, v. 14, ed. 3, p. 1047-1060, 2009. ISSN: 1517-7076. Disponível em: <[qualis.capes.gov.br/webqualis/ConsultaPeriodicos.face](http://qualis.capes.gov.br/webqualis/ConsultaPeriodicos.face)>. Acesso em: 27 nov. 2012.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D.; RAVINDRARAJAH, R. S. Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. **Revista Cerâmica** [on-line], v. 55, ed. 336, p. 448-460, 2009. Disponível em: <[qualis.capes.gov.br/webqualis/ConsultaPeriodicos.face](http://qualis.capes.gov.br/webqualis/ConsultaPeriodicos.face)>. Acesso em: 27 nov. 2012.

DAFICO, D.A. Método de produção de cinza de casca de arroz para utilização em concretos de alto desempenho. Universidade Católica de Goiás. 2009. Disponível em: <[http://www2.ucg.br/nupenge/pdf/Dario\\_Resumo.pdf](http://www2.ucg.br/nupenge/pdf/Dario_Resumo.pdf)>. Acesso em 23 de abr. 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRATAS DE RODAGEM. **ME 092**: Solo - determinação da massa específica aparente, "in situ", com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 1994.

DOS SANTOS, A. P.; LACHOWSKI JÚNIOR, N. **Estudo experimental e análise da viabilidade do emprego do pó de mármore para a produção de concreto auto-adensável**. (Monografia) Curitiba, Universidade Tecnológica do Paraná. 2012. 76f.

FARIAS DE MEDEIROS, M. H.; GOBBI, A.; GROENWOLD, J. A.; HELENE, P. **Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos**. Rem: Revista Escola de Minas, vol. 66, núm. 1, janeiro-março, 2013, pp. 53-65. Minas Gerais-Brasil. Ambiente Construído. Porto Alegre, v. 13, n.1, p. 7-24, jan./mar. 2013.

FRAGA, M. F. **Panorama da geração de resíduos da construção civil em Belo Horizonte**: medidas de minimização com base em projeto e planejamento de obras. (Dissertação) Universidade Federal de Minas Gerais. 2006. 89f.

GODEIRO, M. L. S. Caracterização de pré-concentrado do rejeito de Scheelita da Mina Brejuí em concentrador centrífugo. 2010. **Revista Holos**, ano 26, v. 5, p. 81-90.

GOMES, C. C. **Propriedades mecânicas do concreto com adição de vidro reciclado**. (Monografia) Universidade do Extremo Sul Catarinense. 2011. 14f.

GRANZOTTO, L. **Concreto com adições de borracha**: uma alternativa ecologicamente viável. (Dissertação) Universidade Estadual de Maringá. 2010. 132f.

HU, C.; LARRARD, F.. Rheological testing and modelling of fresh high performance concrete. **Materials and Structures**, v. 28, 1995.

ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2010, v. 1 e v. 2.

ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto**: ciência e tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011, v. 1 e v. 2.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, 2000. 113p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

KOU, S.; POON, C.; WAN, H. Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, 36. ed., p. 881-889, 2012. Disponível em: <[qualis.capes.gov.br/webqualis/ConsultaPriodicos.face](http://qualis.capes.gov.br/webqualis/ConsultaPriodicos.face)>. Acesso em: 24 set. 2012.

LEVY, Salomon M.; HELENE, Paulo. **Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development**. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1975-1980, 2004.

MACHADO, T. G. **Estudo da adição de resíduo de Scheelita em matriz cerâmica: formulação, propriedades e microestrutura.** 143 f. 2012. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação de Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, 2012.

MARQUES, A. C.; NIRSCHL, G. C.; AKASAKI, J. L., Propriedades mecânicas do concreto adicionado com borracha de pneus. **Holos Environment**, v. 6, ed. 1, p. 31, 2006. ISSN: 1519-8634. Disponível em: <qualis.capes.gov.br/webqualis/Consulta.Periodicos.face>. Acesso em: 27 nov. 2012.

METHA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Ibracon, 1994. 669 p.

MENESES, Ilzenete A. **Avaliação de concreto com adição de fibras de PET submetido a altas temperaturas.** (Dissertação) Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2011. 90f.

MODRO, N. L. R.; OLIVEIRA, A. P. N. Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET. **Revista Matéria**, v. 14, ed. 1, p. 725-736, 2009. ISSN 1517-7076. Disponível em: <qualis.capes.gov.br/webqualis/ConsultaPeriodicos.face>. Acesso em: 27 nov. 2012.

MOIZINHO, Joel C. **Caracterização e uso de agregados lateríticos do Distrito Federal e do estado de Roraima em CBUQ.** (Tese) Universidade de Brasília. 2007. 315f.

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.** Revista Ambiente Construído. Porto Alegre, v. 13, n.1, p. 7-24, jan./mar. 2013.

PIETROBELLI, E. R. **Estudo da resistência do concreto utilizando pet reciclado como agregado.** 2010. Trabalho de Monografia II – Curso de Engenharia Civil, Universidade Comunitária da região de Chapecó, UNOCHAPECO, Chapecó, 2010.

PIMENTA, D. S. **Produção de concreto convencional com a utilização de pó de brita.** (Monografia) Universidade Federal da Paraíba. 2012. 60f.

REIMSCHUESSEL, D. E.; WILLIAMS, R. J.; THEURER, K. Chemical analysis, electrochemistry and atomic spectroscopy. In: SIBILIA, J. P. (Ed.). **A guide to materials characterization and chemical analysis.** New York: VCH Publishers, 1988.

ROCHA, Janaíde C.; JOHN, Vanderley M. **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional.** Coletânea HABITARE, v. 4, Porto Alegre, 2003.

STEINER, Luiz R. **Efeito do rejeito de polimento do porcelanato na fabricação de blocos de concreto de cimento Portland.** (Dissertação) Universidade do Extremo Sul Catarinense. 2011. 43f.

TARTUCE, Ronaldo; GIOVANNETTI, Edio. **Princípios básicos sobre concreto de cimento Portland.** São Paulo: PINI: Ibracon, 1990. 107p.

TONUS, Cristian A.; MINOZZI, Patrícia I. **Utilização de agregados reciclados de alvenaria na produção de concreto para contrapisos.** 2013. 67f. Trabalho de

Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2013.

PIETROBELLI, E. R. **Estudo da resistência do concreto utilizando PET reciclado como agregado.** 2010. Trabalho de Monografia II – Curso de Engenharia Civil, Universidade Comunitária da região de Chapecó, UNOCHAPECO, Chapecó, 2010.

### **Sites**

<<http://rmai.com.br>>

<[www.caixa.gov.br](http://www.caixa.gov.br)>

<[www.dnrm.gov.br](http://www.dnrm.gov.br)>

<[www.ecivil.net](http://www.ecivil.net)>

<[www.minabrejui.com.br](http://www.minabrejui.com.br)>

<[www.naturezacompartilhada.blogspot.com](http://www.naturezacompartilhada.blogspot.com)>

<[www.sustentabilidade.sebrae.com.br](http://www.sustentabilidade.sebrae.com.br)>

<[www.terra.com.br/portal/](http://www.terra.com.br/portal/)>

<[www.wwf.org](http://www.wwf.org)>