



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CLAUDIA YANARA MEIRA DA COSTA

ANALOGIA DAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS COM DIFERENTES CIMENTOS
E INCORPORADOS DE RESÍDUOS DO PORCELANATO E SCHEELITA

MOSSORÓ/RN

2019

CLAUDIA YANARA MEIRA DA COSTA

**ANALOGIA DAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS COM DIFERENTES CIMENTOS
E INCORPORADOS DE RESÍDUOS DO PORCELANATO E SCHEELITA**

Trabalho Final de Graduação apresentado ao Conselho do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Nogueira de Codes.

Coorientador: Prof. Me. Alisson Gadelha de Medeiros.

MOSSORÓ/RN

2019

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

C837a Costa, Claudia Yanara Meira da.

Analogia das propriedades de concretos com diferentes cimentos e incorporados de resíduos do porcelanato e scheelita / Claudia Yanara Meira da Costa. - 2019.

94 f. : il.

Orientador: Rodrigo Nogueira de Codes.
Coorientador: Alisson Gadelha de Medeiros.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Curso de Engenharia Civil, 2019.

1. Propriedades mecânicas. 2. Propriedades físicas. 3. Microestrutura. 4. Atividade pozolânica. 5. Sustentabilidade. I. Codes, Rodrigo Nogueira de, orient. II. Medeiros, Alisson Gadelha de, co-orient. III. Título.

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

III

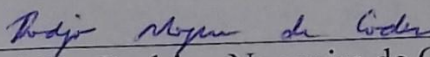
CLAUDIA YANARA MEIRA DA COSTA

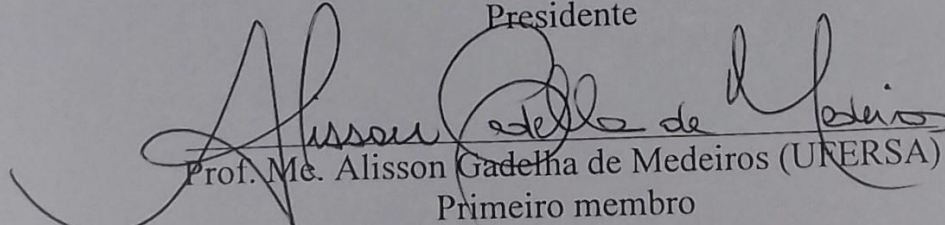
ANALOGIA DAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS COM DIFERENTES CIMENTOS
E INCORPORADOS DE RESÍDUOS DO PORCELANATO E SCHEELITA

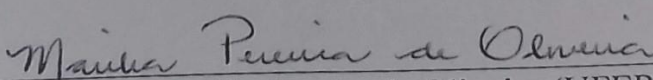
Trabalho Final de Graduação apresentado ao
Conselho do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal Rural do Semi-Árido,
como requisito para obtenção do título de
Engenheira Civil.

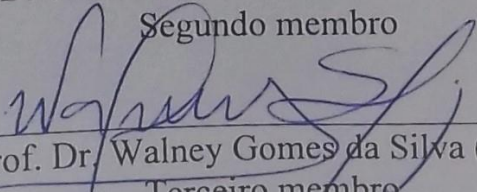
Aprovada em: 19 / 03 / 2019.

BANCA EXAMINADORA


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


Prof. Me. Alisson Gadelha de Medeiros (UFERSA)
Primeiro membro


Prof. Dr. Marília Pereira de Oliveira (UFERSA)
Segundo membro


Prof. Dr. Walney Gomes da Silva (IFRN)
Terceiro membro

AGRADECIMENTOS

A Deus, a quem agradeço infinitamente pela vida e por me guiar em todos os caminhos percorridos.

Aos meus pais, José William e Maria Amélia, aos quais devo eterna gratidão e amor. Todas as minhas conquistas foram possíveis graças a vocês. Em meio a tantos sacrifícios, sempre se dedicaram ao meu melhor.

À minha irmã, Clara Yanina, que mesmo distante, está sempre comigo. A quem sempre recorro para rir ou chorar e que nunca me abandona. Amo você!

Ao meu cunhado, Felipe Gabriel, exemplo de pessoa, de amigo e de profissional. Meu orgulho por você é infinito.

À toda minha família, em geral, por acreditar em mim e sempre torcer por minhas conquistas.

Aos meus amigos, tanto os de longa data quanto aqueles que conheci na UFRSA e participaram ativamente da minha jornada acadêmica: Juliana, Maryane, Boniex, Gabriel, Giovane, Antônio, Amanda Cristine e Rafael. Obrigada por tudo!

Ao meu orientador, Rodrigo Codes, pelos ensinamentos, conselhos, paciência e confiança, que me ajudaram bastante durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador, Alisson Gadelha, por todas as experiências compartilhadas, por todos os ensinamentos acadêmicos e pessoais, e acima de tudo, pela amizade. Obrigada por acreditar no meu potencial e por me permitir aprender diariamente com você.

À professora Elizangela Cabral, a qual tenho como amiga e fonte de inspiração, por ter estado comigo durante toda a graduação. A quem sempre esteve presente quando necessitei de ensinamentos e conselhos.

À ALPE Engenharia, por ter me permitido fazer parte da sua história, por todo desenvolvimento pessoal e profissional, e por ter me mostrado que a educação pode transformar realidades. Aos

alpinistas que estiveram comigo durante toda essa jornada e sempre me motivaram a ser a minha melhor versão.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Walney Gomes e Prof.^a Dr.^a Marília Pereira, por todos os conhecimentos repassados em sala de aula, e por terem aceitado participar da minha defesa, fornecendo contribuições ao trabalho.

A todos os professores com quem tive o prazer de compartilhar uma sala de aula! Obrigada pela contribuição para chegar até aqui.

Ao melhor técnico de laboratório, Valteson, pela paciência e pela inestimável ajuda. Você foi essencial ao desenvolvimento desse trabalho.

Ao professor Walney pela disponibilidade do Laboratório de Construção Civil do IFRN. Agradeço também aos bolsistas, em especial a Douglas, Thamara e Jose, que foram meus companheiros por longos períodos durante a realização dos ensaios.

À professora Solange pela disponibilidade do Laboratório de Saneamento, e ao técnico Adler que me acompanhou durante o procedimento experimental.

Ao técnico Leonardo por me auxiliar durante o preparo de soluções. A Bruno, pela realização da microscopia eletrônica de varredura. A Jussier pela caracterização mineralógica das amostras. E a João Maria pela realização da caracterização química das amostras.

Ao professor Alexandre, pela disponibilidade do Laboratório de Limnologia.

Ao professor Felipe Formiga, por ter me permitido fazer uso das instalações do laboratório da UNP, e aos técnicos Silva Júnior e Lucas pela assistência.

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

RESUMO

Tendo em vista a crescente demanda por materiais na construção civil, especialmente para a produção de concreto, pesquisadores têm buscado alternativas para reduzir o consumo dos recursos naturais de forma a garantir o desenvolvimento sustentável. A incorporação de resíduos oriundos das atividades industriais se apresenta como uma solução benéfica para este problema, bem como uma destinação sustentável para resíduos até então sem utilidade. Nessa perspectiva, o presente trabalho tem por objetivo avaliar as propriedades de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento Portland, substituindo parcialmente o cimento Portland por resíduo do polimento do porcelanato e a areia por resíduo da scheelita, de forma simultânea. Para isso, realizou-se a caracterização física, química e mineralógica dos resíduos e investigou-se as principais características do concreto no estado fresco, como consistência e massa específica, e no estado endurecido, como resistência à compressão axial, absorção, porosidade, velocidade de propagação de pulso ultrassônico e microestrutura. As substituições promoveram redução na consistência dos concretos e aumento da massa específica no estado fresco. No estado endurecido, destaca-se melhoras nos índices de absorção e porosidade, favorecendo a microestrutura, assim como maior velocidade de pulso ultrassônico. Nota-se ainda redução na resistência à compressão aos 28 dias. É possível verificar a qualidade e durabilidade dos concretos produzidos com os resíduos, demonstrando a viabilidade técnica e sustentável das substituições.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas. Propriedades físicas. Microestrutura. Atividade pozolânica. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Considering the growing demand for materials in construction, especially for concrete production, researchers have been looking for alternatives to reduce consumption of natural resources as a way to ensure sustainable development. Incorporation of residues from industrial activities presents itself as a beneficial solution to this problem, as well as a sustainable destination for previously useless waste. In that perspective, this work aims to evaluate the properties of concretes produced with different types of Portland cement, partially replacing Portland cement with porcelain polishing residue and sand with scheelite residue, simultaneously. In order to do this, a physical, chemical and mineralogical analysis of the residues was performed and the main characteristics of concrete on its fresh state were investigated, such as consistency and specific mass, and also on its hardened state, such as resistance to axial compression, absorption, porosity, ultrasonic pulses propagation speed and microstructure. Those substitutions caused reduction on the concretes consistency and increase of specific mass on fresh state. On hardened state, improvements in absorption and porosity ratios are highlighted, benefiting the microstructure, as well as a higher ultrasonic pulse speed. A reduction in compressive strength at 28 days is also observed. It is possible to verify the quality and durability of the concrete produced with residues, demonstrating both technical and sustainable viability of the substitutions.

Keywords: Mechanical properties. Physical properties. Microstructure. Pozzolanic reaction. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: 1ª Etapa do programa experimental	16
Figura 2: 2ª e 3ª Etapa do programa experimental	18
Figura 3: 4ª etapa do programa experimental.....	18
Figura 4: Determinação da massa específica real do cimento utilizando o frasco de “Le Chatelier”	19
Figura 5: Determinação da superfície específica pelo método de Blaine.....	20
Figura 6: Determinação da composição granulométrica por peneiramento	22
Figura 7: Resíduo do polimento do porcelanato.....	23
Figura 8: Determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland	25
Figura 9: Amostras em banho-maria à 90 °C	26
Figura 10: Determinação do índice de atividade pozolânica pelo método da condutividade elétrica	27
Figura 11: Resíduo da scheelita.....	28
Figura 12: Sequência de adição materiais na betoneira para preparo do concreto.....	30
Figura 13: Confecção dos corpos de prova	31
Figura 14: Determinação da consistência pelo <i>slump test</i>	32
Figura 15: Determinação da massa específica no estado fresco.....	32
Figura 16: Ensaio de resistência à compressão axial.....	33
Figura 17: Obtenção do peso submerso do corpo de prova.....	34
Figura 18: Corpos de prova em ensaio de absorção por capilaridade	35
Figura 19: Equipamento para realização do MEV	37
Figura 20: Amostras de concreto metalizadas com ouro.....	37
Figura 21: Curva granulométrica do agregado miúdo.....	42
Figura 22: Curva granulométrica do agregado graúdo.....	43
Figura 23: Composição mineralógica do resíduo do polimento do porcelanato	44
Figura 24: Determinação da condutividade elétrica em diferentes tempos de medição	47
Figura 25: Curva granulométrica do resíduo da scheelita	48
Figura 26: Composição mineralógica do resíduo da scheelita	49
Figura 27: Representação gráfica dos valores de resistência à compressão axial	53
Figura 28: Representação gráfica dos valores de absorção e porosidade.....	55
Figura 29: Representação gráfica da absorção por capilaridade ao longo do tempo	56
Figura 30: Representação gráfica da velocidade do pulso ultrassônico nos corpos de prova ..	57

Figura 31: Representação gráfica do módulo de elasticidade dinâmico	58
Figura 32: Microestrutura da amostra de concreto do traço REF CP II.....	60
Figura 33: Aproximações da microestrutura do concreto REF CP II.....	60
Figura 34: Microestrutura da amostra do concreto T80/15 CP II.....	61
Figura 35: Aproximações da microestrutura do concreto T80/15 CP II	62
Figura 36: Microestrutura da amostra do concreto REF CP V	63
Figura 37: Aproximações da microestrutura do concreto REF CP V	64
Figura 38: Microestrutura da amostra do concreto T80/15 CP V	64
Figura 39: Aproximações da microestrutura do concreto T80/15 CP V	65
Figura 40: Resistência média do concreto aos 28 dias para o cimento CP II 32 e CP V ARI-RS	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação do concreto de acordo com o abatimento do <i>slump test</i>	6
Tabela 2: Resistência média do concreto em MPa, aos 28 dias, em função da relação a/c para vários tipos de cimentos brasileiros.....	7
Tabela 3: Classificação quanto a pozolanicidade do material de acordo com a condutividade elétrica	26
Tabela 4: Traço unitário em massa – concreto referência	29
Tabela 5: Quantitativo de materiais para a produção de 12 corpos de prova do traço referência	29
Tabela 6: Quantitativo de materiais para a produção de 12 corpos de prova do traço com substituição	29
Tabela 7: Classificação da qualidade do concreto pela velocidade do pulso ultrassônico	36
Tabela 8: Características físicas e mecânicas – Cimento Portland CP II-Z-32-RS.....	39
Tabela 9: Caracterização química do cimento CP II-Z-32-RS.....	40
Tabela 10: Características físicas e químicas – Cimento Portland CP V ARI-RS	40
Tabela 11: Composição química do cimento CP V ARI-RS	41
Tabela 12: Características e propriedades do agregado miúdo	42
Tabela 13: Características e propriedades do agregado graúdo	43
Tabela 14: Características físicas do resíduo do polimento do porcelanato.....	44
Tabela 15: Composição química do resíduo do polimento do porcelanato.....	45
Tabela 16: Características e propriedades do resíduo da scheelita.....	49
Tabela 17: Composição química do resíduo da scheelita.....	50
Tabela 18: Valores de abatimento de tronco de cone, em milímetros.....	51
Tabela 19: Massa específica dos concretos no estado fresco	52
Tabela 20: Massa específica dos concretos no estado endurecido	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CH	Hidróxido de Cálcio
CITED	Centro Integrado de Inovação Tecnológica do Semi-Árido
CSAMA	Centro de Síntese e Análise de Materiais Avançados
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
DRX	Difratometria de raios-X
FRX	Espectrometria de Fluorescência de raios-X
IFRN	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
IS	<i>Indian Standard</i>
LASAN	Laboratório de Saneamento
LCC	Laboratório de Construção Civil
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
REF CP II	Traço de referência com cimento Portland CP II-Z-32-RS
REF CP V	Traço de referência com cimento Portland CP V ARI-RS
RPP	Resíduo do Polimento do Porcelanato
RS	Resíduo da Scheelita
T80/15 CP II	Traço com substituições com cimento Portland CP II-Z-32-RS
T80/15 CP V	Traço com substituições com cimento Portland CP V ARI-RS
UERN	Universidade do Estado do Rio Grande do Norte
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
UNP	Universidade Potiguar

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	2
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	Geral	3
1.2.2	Específicos	3
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1	CONCRETO	4
2.2	PROPRIEDADES DO CONCRETO	5
2.2.1	Estado Fresco	5
2.2.2	Estado Endurecido	6
2.3	SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	7
2.3.1	Resíduo de Mineração	10
2.3.1.1	Resíduo da Scheelita	10
2.3.2	Resíduo da Indústria Cerâmica	12
2.3.2.1	Resíduo do Polimento do Porcelanato	12
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	15
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	19
3.1.1	Cimento Portland	19
3.1.1.1	Massa Específica Real	19
3.1.1.2	Finura	19
3.1.1.3	Tempo de Pega.....	20
3.1.1.4	Resistência à Compressão.....	21
3.1.1.6	Perda ao fogo	21
3.1.2	Agregados	21
3.1.2.1	Análise Granulométrica	21
3.1.2.2	Massa Específica Real e Massa Unitária	22
3.1.2.3	Inchamento.....	22
3.1.3	Resíduo do Polimento do Porcelanato	23
3.1.3.1	Massa Específica Real	23
3.1.3.2	Finura	23
3.1.3.3	Composição Mineralógica	24
3.1.3.4	Composição Química.....	24

3.1.3.6	Índice de Atividade Pozolânica	24
3.1.4	Resíduo da Scheelita	27
3.1.5	Água de Amassamento	28
3.1.6	Aditivo	28
3.2	DEFINIÇÃO DO TRAÇO DE CONCRETO	28
3.3	MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	29
3.3.1	Moldes para corpos de prova	29
3.3.2	Fabricação dos corpos de prova	30
3.4	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	31
3.5	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	33
3.5.1	Resistência à Compressão Axial	33
3.5.2	Ensaio de Absorção e Porosidade	34
3.5.3	Ensaio de Absorção por Capilaridade	34
3.5.4	Ensaio de Ultrassom	35
3.5.5	Microscopia Eletrônica de Varredura	36
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	39
4.1.1	Cimento Portland CP II-Z-32-RS	39
4.1.1.1	Caracterização Física e Mecânica	39
4.1.1.2	Caracterização Química	39
4.1.2	Cimento Portland CP V ARI-RS	40
4.1.2.1	Caracterização Física e Mecânica	40
4.1.3	Agregado Miúdo	41
4.1.4	Agregado Graúdo	43
4.1.5	Resíduo do Polimento do Porcelanato	44
4.1.5.1	Características Físicas	44
4.1.5.2	Composição Mineralógica	44
4.1.5.3	Composição Química	45
4.1.5.4	Atividade Pozolânica	46
4.1.6	Resíduo da Scheelita	48
4.1.6.1	Características Físicas	48
4.1.6.2	Composição Mineralógica	49
4.1.6.3	Composição Química	50
4.2	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	51

4.2.1	<i>Slump test</i>	51
4.2.2	Massa Específica	52
4.3	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	53
4.3.1	Resistência à Compressão Axial	53
4.3.2	Absorção e Porosidade	54
4.3.3	Absorção por Capilaridade	55
4.3.4	Massa específica	57
4.3.5	Velocidade do Pulso Ultrassônico	57
4.3.6	Módulo de Elasticidade Dinâmico	58
4.3.7	MEV	59
4.4	INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO NAS PROPRIEDADES AVALIADAS	65
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
	REFERÊNCIAS	70

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil encontra-se como um importante pilar para a sustentação do desenvolvimento econômico e social. Sua cadeia produtiva exige grande consumo de matéria prima para a fabricação de seus materiais, além do elevado consumo de energia e da constante geração de resíduos. O somatório desses fatores resulta em significativos impactos ambientais, contribuindo com esgotamento dos recursos e consequente poluição ambiental (JOHN, 2000).

O concreto é o material mais consumido na cadeia construtiva, sendo o segundo material mais utilizado no mundo (FELIX E POSSAN, 2018; SILVA E LIMA, 2018). A elevada demanda por concreto resulta no alto consumo de cimento, com produção de mais de 4 bilhões de toneladas por ano (VAN OSS, 2017). A indústria produtora do cimento é responsável pela emissão de cerca de 6% de dióxido de carbono no mundo (SHANKS *et al.*, 2019). Ademais, ainda tem-se metade do consumo mundial de minerais destinado a produção de agregados (VALVERDE, 2001).

Partindo da premissa que a reutilização está diretamente associada ao desenvolvimento sustentável, a indústria da construção civil tem buscado alternativas para reduzir o consumo de insumos naturais através da utilização de subprodutos industriais incorporados aos produtos gerados pelos setores industriais (JOHN, 2000).

Medeiros (2016) afirma que aliada a incorporação de subprodutos industriais e a constante busca por melhorias nos materiais de construção, o estudo de novos materiais vem crescendo atualmente. Relacionado a tecnologia do concreto, Metha e Monteiro (2008) citam que as adições minerais podem promover benefícios como melhoria da trabalhabilidade, redução da porosidade, aumento da resistência aos ataques químicos, além da redução de custos na produção devido a redução do consumo de materiais primas naturais.

O Brasil apresenta uma vasta disponibilidade de recursos minerais, e entre estes tem-se a scheelita, que se encontra em elevada concentração na Região do Seridó, Nordeste brasileiro. Nessa área temos localizada a Mina Brejuí que explora esta variedade de minério. A exploração na Mina Brejuí começou por volta da década de 40, e o processo de beneficiamento da scheelita ainda apresenta características rudimentares presentes desde a sua origem (MEDEIROS, 2016). Nesse processo há a geração de grande quantidade de resíduos, que são depositados em bancos a céu aberto (GERAB, 2014).

A indústria produtora de materiais cerâmicos aplicados na construção civil para revestimentos internos e externos, também origina uma significativa quantidade de resíduos. Pode-se destacar o processo de fabricação de peças de porcelanato, em especial, durante a fase de seu polimento, que é realizada para dar acabamento nas peças (SILVA, 2005; SINGH E SRIVASTAVA, 2018).

Diante desse panorama, o presente estudo visa avaliar as propriedades em concretos de diferentes tipos de cimento Portland, com substituições parciais simultâneas dos resíduos da scheelita e do polimento do porcelanato, em relação ao agregado natural miúdo e o aglomerante cimentício, respectivamente. Tais incorporações buscam um destino sustentável aos resíduos, normalmente descartados pelo setor industrial, bem como uma redução no consumo de materiais naturais. Em síntese, busca-se a aplicação de novas composições de concretos aplicáveis aliadas da sustentabilidade no âmbito da cadeia construtora e industrial.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Visando otimizar o consumo de subprodutos industriais em detrimento dos recursos naturais aplicados a engenharia civil, tem-se buscado alternativas que sejam ambientalmente corretas, socialmente justas e economicamente viáveis (SHAFIGH *et al.*, 2014). De acordo com Metha e Monteiro (2008), faz-se necessário ter conhecimento das vantagens e limitações dos aditivos e adições que podem ser realizadas no concreto.

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

O processo de beneficiamento da scheelita realizado na Mina Brejuí resulta diariamente cerca de 50 m³ de resíduo do mineral. Essa grande quantidade de resíduo produzido é depositada em pilhas sobre o solo (PAIVA, 2013). O setor de fabricação dos revestimentos do tipo porcelanato produz uma elevada quantidade de pó durante a etapa de polimento das peças. A indústria da Cerâmica Elizabeth, localizada na cidade de João Pessoa, na Paraíba, produz cerca de 32 toneladas de resíduo diariamente. Considerando-se as demais industriais de porcelanato presentes no Brasil, pode-se inferir que milhares de toneladas de pó são estocadas diariamente (SILVA, 2012).

A deposição desses resíduos na natureza altera a paisagem natural e gera inúmeros impactos ambientais. Considerando-se a abundância desses resíduos, faz-se necessária a busca por destinos sustentáveis desses materiais, justificando-se estudar suas inserções de forma conjunta na produção de concreto, de forma a dar uma destinação sustentável aos resíduos conjuntamente com a redução do consumo de matérias-primas naturais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O presente estudo tem por objetivo avaliar propriedades de concretos com distintos tipos do cimento Portland, CP II-Z-32-RS e CP V ARI-RS, com substituições parciais simultâneas do cimento e da areia, pelo resíduo do polimento do porcelanato e resíduo da scheelita, respectivamente.

1.2.2 Específicos

- Obter a caracterização física, química e mineralógica dos resíduos do polimento do porcelanato e da scheelita;
- Aferir possíveis características pozolânicas dos resíduos do polimento do porcelanato e da scheelita;
- Avaliar a influência da substituição parcial simultânea dos resíduos nas propriedades de consistência e massa específica dos concretos no estado fresco;
- Avaliar o comportamento do concreto no estado endurecido com substituição parcial simultânea dos resíduos com relação às propriedades físicas e mecânicas;
- Identificar os produtos de hidratação através da microestrutura dos concretos e correlacionar com suas propriedades;
- Correlacionar possíveis variações nas propriedades dos concretos produzidos com os cimentos CP II-Z e CP V ARI-RS.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONCRETO

Conforme Kett (2010) expõe, o concreto de cimento Portland pode ser definido como um composto de três materiais básicos, sendo estes cimento Portland, agregados e água. Outros materiais podem ser incorporados a mistura objetivando proporcionar propriedades especiais. Esses materiais são chamados de aditivos, que incluem agentes aceleradores ou retardadores de pega, cinzas volantes, sílica ativa, escória de alto forno, entre outros elementos.

O cimento Portland em mistura com a água atua como um ligante no meio ao qual estão inseridos os agregados, apresentando plasticidade no estado fresco e boas propriedades de resistência mecânica no estado endurecido (NEVILLE E BROOKS, 2010).

Para a união entre os grãos dos agregados na obtenção de argamassas e concretos são utilizados os materiais aglomerantes. Estes são, em geral, pulverulentos podendo ser aéreos ou hidráulicos. Os aglomerantes aéreos endurecem pela ação química do dióxido de carbono presente na atmosfera, enquanto os hidráulicos endurecem pela ação da água (TIBONI, 2007). De acordo com Metha e Monteiro (2008), o cimento Portland é um aglomerante hidráulico obtido a partir da moagem de clínquer constituídos principalmente por silicatos hidráulicos de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio, apresentando-se ainda eventuais adições.

Segundo Bauer (2011), agregado são materiais particulados, de granulometria variada, que não apresentam coesão e de atividade química praticamente nula. Podem ser classificados segundo a sua origem em naturais, que já se encontram na natureza sob forma de partículas, como a areia, ou industrializados, que necessitam passar por processos industriais para a obtenção de forma particulada, como a brita. O autor ainda classifica os agregados conforme o peso específico aparente das partículas em leve, médio ou pesado. Os leves possuem massa específica menor que 1000 kg/m^3 , os médios entre 1000 e 2000 kg/m^3 e os pesados apresentam massa específica maiores que 2000 kg/m^3 .

Os agregados também podem ser classificados segundo a dimensão das partículas, podendo ser miúdo ou graúdo. Os agregados miúdos são aqueles que apresentam granulometria entre $150 \mu\text{m}$ e $4,75 \text{ mm}$. Já os agregados graúdos são aqueles cujos grãos encontram-se com diâmetro entre $4,75 \text{ mm}$ e 75 mm (ABNT NBR 7211, 2009). Para Angulo (2005), as principais

finalidades dos agregados são a transmissão de tensões solicitadas ao concreto através de seus grãos, redução do efeito das variações volumétricas e redução de custos através da redução do consumo de aglomerante, que apresenta maior custo aquisitivo.

Apesar de estar em menor proporção, a água de amassamento é a responsável pelas reações de hidratação do cimento. Deve estar de acordo com os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 15900-1/2009, sendo isenta de impurezas, como óleos, gorduras e matéria orgânica, com pH regulado e teores máximos de substâncias químicas como cloretos, sulfatos e álcalis.

Para a produção do concreto, pode-se ainda adicionar materiais para promover mudanças nas propriedades do seu estado fresco ou endurecido. Os aditivos/adições são materiais que podem ser utilizados como componentes do concreto, desde que estes sejam diferentes de água, agregado, cimentos hidráulicos ou fibras (METHA E MONTEIRO, 2008).

2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO

2.2.1 Estado Fresco

O concreto em estado fresco encontra-se completamente misturado e em estado plástico, apresentando trabalhabilidade para ser moldado e adensado (ABNT NBR 5738, 2015).

De acordo com Metha e Monteiro (2008), a trabalhabilidade é a propriedade mais importante do concreto no estado fresco, sendo esta a facilidade com a qual o concreto pode ser manipulado sem haver segregação entre os materiais. Para Helene e Andrade (2010), consistência do concreto pode ser definida como maior ou menor capacidade do concreto de se deformar sob a ação da própria massa, sendo utilizada como um índice de fluidez do concreto fresco, influenciando diretamente em sua trabalhabilidade.

A ABNT NM 67/1998 estabelece as diretrizes para determinação da consistência do concreto fresco através do abatimento do tronco de cone, também nomeado por *slump test*. A Tabela 1 apresenta a classificação da consistência segundo o valor em milímetros do abatimento do *slump test*, e o tipo de obra em que podem ser aplicados.

Tabela 1: Classificação do concreto de acordo com o abatimento do *slump test*

Consistência	Abatimento (mm)	Tipo de aplicação
Muito seca	0	Pavimentação
Seca	0 a 20	Estrutura de concreto armado ou protendido
Rija	20 a 50	Estruturas correntes
Plástica	50 a 120	Peças com alta densidade de armadura
Úmida	120 a 200	Concreto inadequado
Líquida	200 a 250	-

Fonte: Adaptado de Tartuce (1990) *apud* Paiva (2013).

A massa específica é outra propriedade do concreto que pode ser avaliada no estado fresco, sendo comum a sua determinação quando se está avaliando a trabalhabilidade. Esta propriedade depende da massa específica do agregado, de sua porosidade, textura, forma e tamanho das partículas (NEVILLE E BROOKS, 2010).

2.2.2 Estado Endurecido

O concreto no estado endurecido encontra-se sólido e com propriedades mecânicas desenvolvidas. Uma das principais propriedades que caracteriza o concreto endurecido é a resistência a compressão, sendo utilizada nos dimensionamentos das estruturas de concreto (ABNT, 2006).

Materiais heterogêneos como o concreto costumam ter suas propriedades influenciadas de acordo com cada componente constituinte. A propriedade de resistência encontra-se inversamente proporcional a porosidade do concreto. A porosidade da matriz do concreto, constituída por pasta de cimento hidratada, e da zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo normalmente determinam a resistência de dosagens do concreto. E esta porosidade depende de fatores como a relação água/cimento, processo de adensamento, proporção de materiais na dosagem, condições de cura, entre outros (METHA E MONTEIRO, 2008).

A resistência do concreto é influenciada por diversos fatores, entre estes tem-se o tipo de cimento e a relação água/cimento do traço. A Tabela 2 dá uma ideia dessa influência.

Tabela 2: Resistência média do concreto em MPa, aos 28 dias, em função da relação a/c para vários tipos de cimentos brasileiros

Tipo e classe de cimento	Relação a/c				
	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45
CP I 32	28	32	37	41	47
CP II 32	24	28	31	35	39
CP II 40	28	32	36	41	46
CP III 32	23	27	31	36	41
CP III 40	27	32	37	42	49
CP IV 32	24	28	32	36	41
CP V ARI-RS	30	33	38	42	46
CP V ARI	33	38	42	47	53

Fonte: Isaia (2017).

Outra propriedade requerida pelo concreto endurecido é a durabilidade. Segundo a ABNT NBR 6118/2014, a durabilidade é a capacidade de resistir às influências ambientais previamente definidas durante o desenvolvimento do projeto. Ou seja, o concreto durável deve apresentar bom desempenho em serviço de acordo com as condições sob as quais ele foi especificado.

Para Neville e Brooks (2010), a durabilidade do concreto pode ser influenciada por fatores internos e externos, sendo difícil atribuir um problema de durabilidade a um único fator isolado devido a sinergia entre diversos processos de deterioração.

A facilidade de ingresso de fluidos, tanto líquidos como gases, nas estruturas de concreto é um importante fator para a durabilidade. O ingresso dessas substâncias pode promover o deslocamento de agentes agressivos ao interior do concreto, como o sulfatos, que agredem o concreto, especialmente os cloretos, que influenciam na corrosão das armaduras. E, apesar da durabilidade ser uma propriedade dependente de variados fatores, sabe-se que a redução da permeabilidade do concreto é uma das formas de aumentar a sua durabilidade (BARROS, 2008).

2.3 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A crescente quantidade de resíduos gerados pela indústria, inclusive pela construção civil, tem promovido estudos em vários países quanto à possibilidade de reaproveitamento

desses resíduos como componentes incorporados aos materiais de construção, seja através da substituição, podendo ser parcial ou total, de algum constituinte ou incorporação nos produtos finais (FERNANDES E AMORIM, 2014; KHAJURIA E SIDDIQUE, 2014; DASH, PATRO E RATH, 2016).

Hussein *et al.* (2018), relatam que a indústria do concreto consome grande quantidade de recursos naturais, resultando diretamente em dois grandes impactos. O primeiro é na escassez de matéria-prima natural e o segundo é a elevada quantidade de resíduos gerados por essa indústria.

A composição básica do concreto de cimento Portland apresenta cerca de 12% de cimento, 80% de agregado e 12% de água de amassamento. Em números anuais, essas porcentagens representam um consumo em torno de 1,5 bilhão de toneladas de cimento e 10 bilhões de toneladas de agregados naturais (METHA E MONTEIRO, 2008, DASH, PATRO E RATH, 2016). Por outra percepção, as atividades industriais, de mineração, domésticas e agrícolas geram resíduos sólidos em grandes quantidades, e que podem ser utilizados como materiais sustentáveis na construção civil (MOHAMADALI, 2017). As incorporações de resíduos industriais são realizadas com materiais alternativos que podem substituir o cimento e/ou os agregados na mistura do concreto (BARROS, 2016; BREITENBACH *et al.*, 2017).

De forma geral, o reaproveitamento de resíduos é aplicável em praticamente todos os setores da construção civil, e os resultados de pesquisas com esta finalidade têm mostrado satisfação em relação à qualidade de concretos sustentáveis (FERNANDES E AMORIM, 2014; ASSI *et al.*, 2018). Os estudos de concretos sustentáveis estão relacionados a todos aqueles que consigam reduzir a quantidade de gases tóxicos emitidos na atmosfera durante a fabricação de cimentos, ou que consumam rejeitos industriais, inclusive entulhos da própria construção (TUTIKIAN E HELENE, 2011).

Diante da gama de resíduos que podem substituir os componentes na produção de materiais de construção, pesquisadores têm se dedicado a avaliar as características desses resíduos que podem influenciar nas propriedades dos materiais, bem como o resultado da interação desses resíduos com os demais componentes. Garcia *et al.* (2015) avaliou a atividade pozolânica de resíduos da cerâmica vermelha. Dash, Patro e Rath (2016) reuniram alguns tipos de resíduos que podem ser utilizados para substituições em concretos, como a cinza volante, cinza de carvão e escória de cobre. Mohamadali (2017) analisou os efeitos nas propriedades de

concretos com substituição da areia por bagaço da cana-de-açúcar, casca de amendoim, serragem de madeira e concha de ostra.

Ainda entre as inúmeras adições existentes, pode-se citar a cinza da casca de arroz (CCA), um resíduo proveniente da agroindústria, que é obtido com o processo de beneficiamento do grão de arroz. A CCA possui elevado teor de sílica em sua composição e, quando tratada, apresenta elevado potencial pozolânico (REGO, 2004; POUEY, 2006; TRINDADE, 2011). Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2008) concluíram que a inserção da CCA como substituição parcial do cimento promove redução na absorção de água, penetração e difusão de cloretos em concretos. Isaia (2017) constatou a viabilidade da substituição de 15% de cimento por CCA em concretos com resistência à compressão entre 25 MPa e 40 MPa.

A sílica ativa, subproduto industrial das ligas de silício metálico e das ligas ferro-silício, apresenta-se como um material altamente pozolânico (HOFFMANN, 2001; CARMO, 2006). Carmo e Portella (2008) substituíram 8% da massa de cimento por sílica ativa em concretos e concluíram que estes apresentaram melhores propriedades mecânicas e de trabalhabilidade quando comparados aos concretos sem adição.

A escória de alto forno, resultante da indústria da produção do ferro fundido, também é uma opção como adição em concretos, podendo contribuir de forma positiva com o ganho de resistência nas primeiras idades (COELHO *et al.*, 2006; MOURA, 2000; RESENDE, 2012). Sales *et al.* (2012) avaliou o comportamento do concreto com adição de escória de alto forno na porcentagem de 25% de substituição em relação a massa de cimento, em diferentes basicidades. Conclui-se que a adição da escória de alto forno afetou o desenvolvimento da resistência à compressão, sendo estes menores para as menores basicidades.

Os resíduos provenientes de construção e demolição (RCD) também vêm sendo objeto de diversas pesquisas em todo o mundo. Utilizado principalmente como agregado, os estudos com RCD se dedicam majoritariamente a aplicações em argamassas, concretos e pavimentos (OSSA, GARCÍA E BOTERO, 2016; KUMAR, 2017; ALEXANDRIDOU, ANGELOPOULOS E COUTELIERIS, 2018; ABID *et al.*, 2018, SHARKAWI *et al.*, 2018). Kruger, Souza e Konofal (2013) avaliaram a trabalhabilidade de argamassas e concretos com RCD substituindo parcialmente a areia em variados traços, concluindo que é possível melhorar a trabalhabilidade sem alterar a relação água/cimento, modificando apenas a relação água/materiais secos.

2.3.1 Resíduo de Mineração

Na atividade de mineração há grande quantidade de geração de resíduos, principalmente provenientes dos processos de extração e tratamento/beneficiamento dos minerais (PENG, YANG E OUYANG, 2015; IBRAM, 2016). Baghel e Nagesh (2017) relatam que esses resíduos contaminam os solos, os corpos de águas e modificam as paisagens. Afum, Caverson e Bem-Awuah (2018) mostram que os resíduos de mineração apresentam potencial de reuso, com vantagens econômicas e ambientais.

Menezes *et al.* (2012) incorporou resíduo da serragem de granito na produção de tijolos cerâmicos e resíduo do processamento de caulim em tijolos de solo-cal, verificando aumento da resistência à compressão e diminuição dos custos de produção. Stolboushkin *et al.* (2016) investigou a aplicação do resíduo de mina de carvão em blocos cerâmicos, constatando-se benefícios com relação a resistência, microestrutura menos porosa e menor variação de forma com o aumento de temperatura.

2.3.1.1 Resíduo da Scheelita

O mineral scheelita pertence à classe dos tungstatos. Sua exploração ocorre com a finalidade de obter o tungstênio, material de grande utilização na indústria metalurgia, bélica, petrolífera, na produção de canetas esferográficas, entre outros (GERAB, 2014).

A Mina Brejuí, localizada no município de Currais Novos, Rio Grande do Norte, é uma exploradora de scheelita desde 1940. O grupo de mineração Tomaz Salustino é o responsável pela direção da mina, e exerce as atividades de mineração com respeito ao meio ambiente e a sociedade (MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO S.A., 2019). Entretanto, por apresentar um processo bastante rudimentar, o beneficiamento do mineral ocasiona a formação elevada de resíduo, sendo estimado um acúmulo de 4,5 milhões de toneladas do resíduo grosso e 2,5 milhões do resíduo fino (GERAB, 2014).

De forma simplificada, o processo de beneficiamento da scheelita inicia-se com as detonações no interior das minas. As rochas fragmentadas são levadas para grelhas separadoras, que as dividem de acordo com a granulometria. As rochas seguem para o britador para redução de granulometria e posterior peneiramento vibratório. Esse material segue para o moinho de martelo e depois para separação hidráulica, separando as partículas de densidades diferentes. Segue-se então para as mesas vibratórias que separam o material em três parcelas: A scheelita

propriamente dita, ainda em material granular; o misto, formado por resíduo mais scheelita; e o resíduo, composto por partículas de granulometria arenosa, que será descartado (GERAB, 2014).

Os resíduos provenientes do beneficiamento da mina Brejuí apresentam homogeneidade química, granulométrica e mineralógica. Grande proporção dos minerais presentes no resíduo corresponde a calcita e quartzo (CARVALHO *et al.*, 2002). Segundo Medeiros (2016), é possível observar a semelhança existente entre o resíduo grosso da scheelita e a areia natural utilizada na produção de concreto, através de análise granulométrica.

Machado (2012) adicionou o resíduo da scheelita (RS) em matriz cerâmica caulinita em percentuais de 5%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de substituição da areia, avaliando a microestrutura e propriedades físicas. A adição resultou em um produto que atende as propriedades tecnológicas estabelecidas pelas normas técnicas para produção de blocos e telhas cerâmicas, sendo o percentual de 20% o de melhores resultados.

Paiva (2013) utilizou o RS em substituição ao agregado miúdo na produção de concreto de cimento Portland. As porcentagens substituídas por resíduo foram de 0% até 100%, com variação de 10%. Foram avaliadas as propriedades de trabalhabilidade, resistência à compressão axial, resistência à tração diametral, absorção de água, índice de vazios e massa específica. O traço com substituição de 60% foi o que demonstrou os melhores resultados com relação as propriedades analisadas.

Medeiros (2016) substituiu a areia pelo RS grosso na formulação de argamassas de revestimento, em porcentagens de 25%, 50%, 75% e 100%. Avaliou-se a consistência, a retenção de água e o teor de ar incorporado no estado fresco, e a resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção e módulo de elasticidade dinâmico no estado endurecido. As argamassas com substituição apresentaram maior retenção de água de amassamento, com maior resistência mecânica, porém com maior absorção do que a argamassa de referência com 0% de areia substituída.

Carlos (2018) desenvolveu argamassas para engobes cerâmicos com adição do RS em substituição da areia. Objetivou-se avaliar a retração linear, absorção de água, porosidade, resistência à flexão e influência da temperatura de queima. Com menor índice de absorção e porosidade, o material com substituição apresentou maior resistência à flexão para todas as

temperaturas de sinterização. Os resultados mostraram o potencial de aplicação do resíduo da scheelita como alternativa em substituição da areia.

Alfonso *et al.* (2018) adicionaram resíduo de mina de tungstênio à matéria prima do vidro, avaliando as propriedades mecânicas e a atividade térmica, concluindo que estes apresentam maior durabilidade e menor consumo de energia durante o processo de fabricação.

A utilização do RS na construção civil é viável, apresentando-se como uma forma de destinação sustentável ao resíduo, bem como uma alternativa para diminuição do consumo dos recursos naturais (COSTA FILHO, 2017; SEDIRA, GOMES E MAGRINHO, 2018; CARLOS, 2018).

2.3.2 Resíduo da Indústria Cerâmica

Os materiais cerâmicos são utilizados para a produção de diversos bens, como utensílios domésticos, louças sanitárias, azulejos, ladrilhos e isoladores elétricos de alta tensão (ALVES *et al.*, 2014). Os resíduos da indústria cerâmica pode ser dividido em duas classes. Uma é formada por resíduos cerâmicos de pasta vermelha, utilizados na fabricação de blocos e telhas. E a outra engloba os resíduos cerâmicos de grês, que produz elementos vitrificados e de baixa porosidade (TORGAL E JALALI, 2010). Pesquisadores constataram que durante a produção de materiais cerâmicos, cerca de 30% do material torna-se resíduo (MEDINA, FRÍAS E ROJAS, 2012; ZIMBILI, SALIM E NDAMBUKI, 2014).

Rek *et al.* (2015) substituíram parte do agregado natural miúdo por resíduo de louças sanitária triturada na produção de argamassa de cimento Portland. Como resultado constataram que adição provoca redução na trabalhabilidade e consistência no estado fresco, porém melhora as propriedades de durabilidade e aumenta a resistência à compressão.

2.3.2.1 Resíduo do Polimento do Porcelanato

A ABNT NBR 15463/2013 define porcelanato como uma placa para revestimento do tipo cerâmico que possui baixa absorção de água e elevado desempenho técnico. Existem diversos tipos de porcelanato, que variam de acordo com coloração e forma, podendo estes estar entre esmaltados ou não esmaltado, polido ou natural, retificado ou não retificado.

A produção do porcelanato é dividida em etapas de dosagem, moagem, atomização, prensagem, secagem, queima e polimento, sendo esta última opcional, a depender do modelo desejado. O porcelanato do tipo polido é o mais consumido entre as construções, resultando na alta geração de resíduo durante o processo de polimento (SOUZA, 2007; NASCIMENTO, 2016).

O resíduo do polimento do porcelanato (RPP) é composto por uma mistura da massa do próprio material cerâmico proveniente do polimento e pelos resíduos desprendidos do material abrasivo presente nos instrumentos de polimento (MARQUES *et al.*, 2007). Devido a presença de impurezas, o RPP não pode ser reutilizado no processo de obtenção do porcelanato, sendo descartado em pilhas sobre o solo (JACOBY E PELISSER, 2015).

A granulometria fina desse resíduo e sua composição química despertam interesse em sua utilização como potencial substituto ao cimento Portland na fabricação de concretos. A finura do RPP pode proporcionar o efeito *filler*, resultando no preenchimento dos vazios do concreto com as partículas de dimensões reduzidas com consequente aumento da densidade do material, além de promover reações pozolânicas devido a presença de sílica amorfa e alumina em sua composição, que maximizam a hidratação do cimento Portland (PELISSER *et al.*, 2011; BREITENBACH *et al.*, 2017). A combinação dos efeitos pozolânicos e *filler* representa uma contribuição importante para a resistência e durabilidade (VIEIRA, 2005).

Silva (2005) investigou o comportamento do concreto de cimento Portland com a incorporação do RPP nas porcentagens de 10% e 20% em relação a massa de cimento, avaliando a trabalhabilidade e consistência no estado fresco, e resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral. A análise dos resultados permitiu concluir que o uso do RPP como adição mineral ao concreto melhora seu desempenho, contribuindo com a preservação do meio ambiente.

Souza (2007) estudou o emprego do RPP em concreto de cimento Portland, incorporando de 10% a 50% em relação a massa de cimento, em traços com e sem aditivo plastificante. Constatou-se que o resíduo altera significativamente a consistência do concreto no estado fresco, promovendo aumento na resistência à compressão aos 28 dias e com redução da porosidade e absorção.

Jacoby e Pelisser (2015) substituíram 5%, 10% e 20% da massa de cimento Portland em pastas de cimento por RPP e constataram aumento de 18% na resistência à compressão aos 84 dias. Com análise termogravimétrica puderam concluir que a portlandita formada pela

hidratação cimento foi consumida pela sílica presente no resíduo, resultando em silicato de cálcio hidratado, caracterizando reações pozolânicas.

Sampaio, Martinelli e Gomes (2017) caracterizaram concreto leve estrutural contendo resíduos de polimento do porcelanato, borracha de pneu e calcário, utilizados em substituição parcial do agregado miúdo natural. As combinações de 10% a 15% de substituição apresentaram redução na absorção, índice de vazios e porosidade em torno de 17% em relação ao concreto convencional. Esse resultado sugere uma maior durabilidade do concreto.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Realizou-se uma pesquisa do tipo experimental, sendo está dividida em quatro etapas. Todos os procedimentos e ensaios realizados foram baseados nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

O resíduo da scheelita utilizado é oriundo do beneficiamento do mineral na Mineração Tomaz Salustino S/A. Enquanto que o resíduo do polimento do porcelanato é provindo da Fábrica de Revestimentos Cerâmicos Elizabeth, localizada no município de Conde, Paraíba.

A primeira etapa consistiu na caracterização física e química dos materiais. A segunda compreendeu a confecção dos corpos de prova, sendo concomitantemente realizada com a terceira, que consistia na avaliação das propriedades do concreto no estado fresco. A quarta e última etapa experimental se deu com a avaliação das propriedades do concreto no estado endurecido.

A caracterização dos materiais constituintes, confecção dos corpos de prova utilizados na pesquisa foram realizadas no Laboratório de Construção Civil (LCC) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), campus Mossoró.

Os ensaios para avaliação das propriedades dos concretos no estado fresco e endurecido também foram realizados no LCC do IFRN, com exceção do ensaio de resistência à compressão axial, que foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Potiguar (UNP).

A caracterização mineralógica do RPP e do RS foi feita no Centro Integrado de Inovação Tecnológica do Semi-Árido (CITED), presente na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA).

O ensaio de perda ao fogo foi realizado no Laboratório de Química e Mineralogia do Solo da UFERSA.

A composição química do RPP e do RS foi realizada no Centro de Síntese e Análise de Materiais Avançados (CSAMA) da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN).

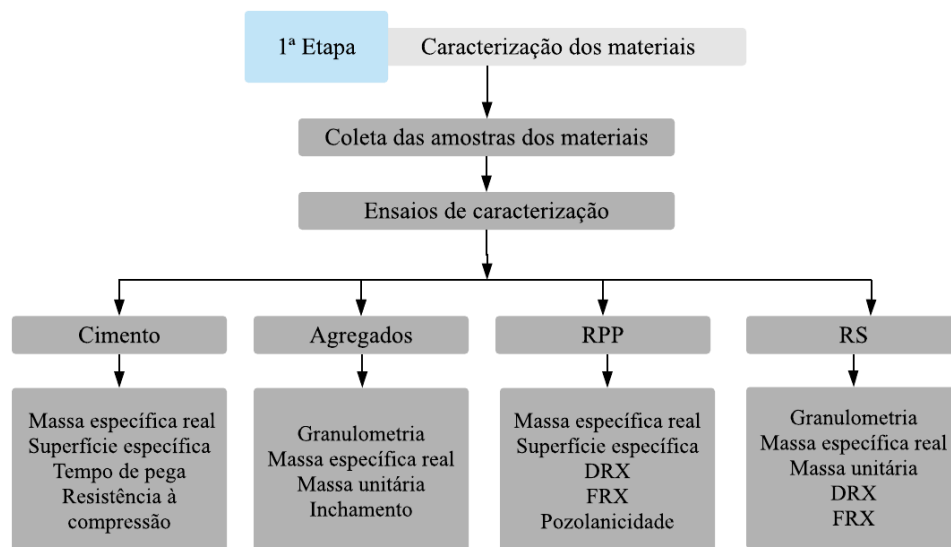
Os estudos de atividade pozolânica pelo Método Chapelle Modificado e pelo método da Condutividade Elétrica foram realizados no Laboratório de Saneamento (LASAN) da UFERSA.

A criogenia em nitrogênio líquido realizada nas amostras de concreto para análise de microscopia eletrônica de varredura foi realizada no Laboratório de Limnologia e Qualidade de Água do Semi-Arido (LIMNOAQUA) da UFERSA.

As observações das amostras no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) foram efetuadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica da UFERSA.

A Figura 1 ilustra o fluxograma detalhado da primeira etapa do presente programa experimental.

Figura 1: 1ª Etapa do programa experimental



Fonte: Autora (2019).

Após a caracterização dos materiais componentes, passa-se para a segunda etapa do programa experimental. Para a fabricação dos concretos, definiu-se um traço com resistência à compressão aos 28 dias de 40 MPa. Este traço foi definido com base em estudos previamente realizados por outros autores.

As porcentagens de substituição dos materiais foram de 0% de resíduo da scheelita e 0% do resíduo do polimento do porcelanato, caracterizando-se estes como concretos de referência. E na proporção de 80% de massa de RS para 20% de massa de agregado miúdo natural, em substituição simultânea de 15% da massa do cimento Portland por RPP. Estas porcentagens de substituições foram definidas com base nas pesquisas desenvolvidas por Paiva

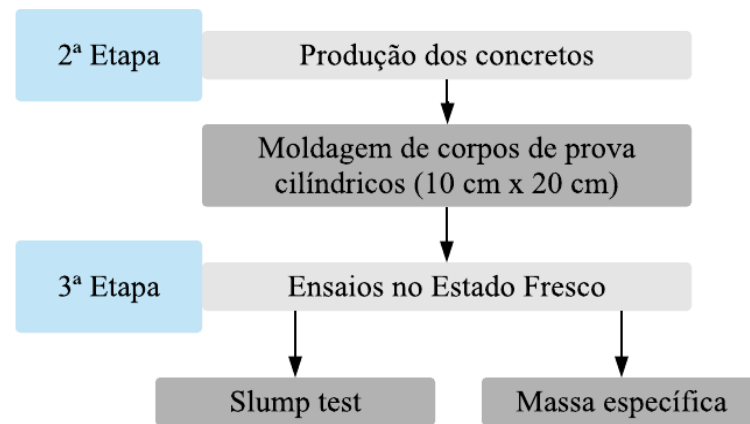
(2013), Jacoby (2015), Silva (2005) e Medeiros (2016). Ressalta-se ainda que, além destes embasamentos, esta pesquisa teve suporte em resultados parciais de um Projeto de Tese (PID10015-2018) em andamento de (MEDEIROS, GURGEL E SILVA, 2018) no Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da UFERSA.

Os cimentos empregados nesta pesquisa foram o CP II-Z-32-RS (cimento Portland com adição de material pozzolânico, Resistente ao Ataque de Sulfatos) e o CP VARI-RS (cimento Portland de Alta Resistência Inicial, Resistente ao Ataque de Sulfatos), ambos da marca Mizu. Jacoby (2015) afirma que o cimento CP II-Z-32-RS é equivalente ao tipo MH-II padrão da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e o tipo CEM II/B-L 32.5 para a *European Standard* EN 197-1. O CP VARI-RS equivale ao tipo C150-07 III de alta resistência inicial, também da ASTM e ao CEM I 52.5 de acordo com EN 197-1.

O traço referência com cimento CP II-Z-32-RS foi denominado de REF CP II, enquanto que o referência com cimento CP VARI-RS foi chamado de REF CP V. O traço com substituições e cimento CP II-Z-32-RS recebeu o nome de T80/15 CP II, e para o com substituições e cimento CP VARI-RS, denominou-se T80/15 CP V.

A terceira etapa consistiu na avaliação das propriedades dos concretos no estado fresco. Os ensaios realizados foram o de consistência através do *slump test* e massa específica. Ambos os ensaios foram realizados imediatamente após a produção dos concretos e antes da moldagem dos corpos de prova, caracterizando a ocorrência paralela da segunda e terceira etapa. A Figura 2 demonstra o fluxograma das atividades da segunda e terceira etapa.

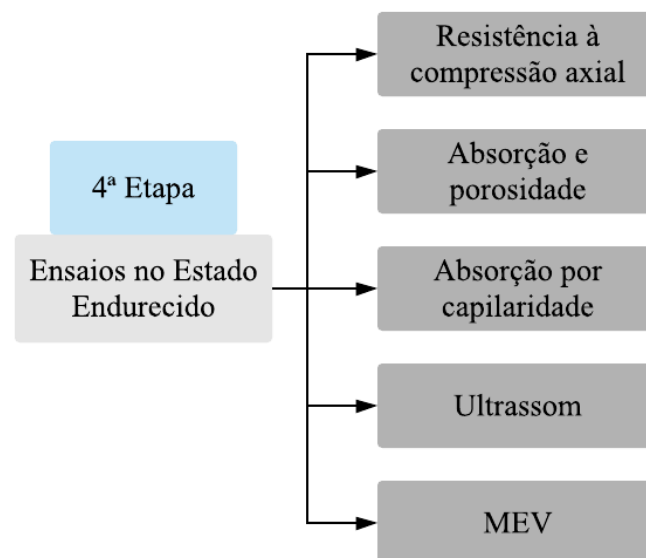
Figura 2: 2ª e 3ª Etapa do programa experimental



Fonte: Autora (2019).

Durante a quarta etapa (Figura 3), avaliou-se as propriedades mecânicas e a microestrutura dos concretos no estado endurecido após 28 dias de cura. As propriedades foram avaliadas através da realização dos ensaios de resistência à compressão axial, absorção e porosidade, absorção por capilaridade e MEV.

Figura 3: 4ª etapa do programa experimental



Fonte: Autora (2019).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Cimento Portland

Conforme descrito na primeira etapa, a caracterização do cimento deu-se com a realização dos ensaios de massa específica real, superfície específica, tempo de pega e resistência à compressão.

3.1.1.1 Massa Específica Real

A massa específica real de cada tipo de cimento foi determinada de acordo com a ABNT NBR 16605/2017.

Figura 4: Determinação da massa específica real do cimento utilizando o frasco de “Le Chatelier”



Fonte: Autora (2019).

3.1.1.2 Finura

A finura do cimento foi determinada pelo resíduo na peneira 75 μm e pela superfície específica.

A ABNT NBR 11579/2013 prescreve o método de peneiramento a seco para determinar em porcentagem, em massa, de cimento cujas dimensões dos grãos são superiores a 75 μm .

Para a determinação da superfície específica, seguiu-se de acordo com o estabelecido na ABNT NBR 16372/2015. Este procedimento determina a finura do cimento, observando-se o tempo requerido para uma determinada quantidade de ar fluir através de uma camada de cimento compactada.

Figura 5: Determinação da superfície específica pelo método de Blaine



Fonte: Autora (2019).

3.1.1.3 Tempo de Pega

O tempo de pega é determinado com o objetivo de estabelecer parâmetros relacionados ao tempo de manuseio para a utilização do concreto fresco. O tempo de início de pega caracterizado pelo início das reações químicas de hidratação do cimento com a água, e o fim de pega é tomado com o endurecimento da pasta. Seguiu-se de acordo com o prescrito na ABNT NBR 16607/2018.

3.1.1.4 Resistência à Compressão

Para a determinação da resistência à compressão, foram moldados corpos de prova cilíndricos, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, conforme preconiza a ABNT NBR 7215/2019. De acordo com a ABNT NBR 16697/2018, as idades para rompimento são de 3 dias, 7 dias e 28 dias, enquanto que para o cimento Portland do tipo CP V, as idades são 1 dia, 3 dias e 7 dias.

3.1.1.5 Composição Química

A composição química dos cimentos foi determinada por análise de Espectrometria de Fluorescência de raios-X (FRX). O equipamento empregado na análise foi o espectrômetro da marca SHIMADZU, modelo EDX-7000, com tensão de aceleração máxima de 50 kV.

3.1.1.6 Perda ao fogo

Para a avaliação de perda ao fogo, seguiu-se as prescrições presentes na ABNT NBR NM 18/2012. O material passou por secagem em estufa à $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por 24 horas para retirada de umidade. Pesou-se $1,000 \text{ g} \pm 0,0001\text{g}$ de amostra, colocou-se em cadinho por porcelana e levou-se a forno tipo mufla durante o período de 1 hora à temperatura de 1000°C .

3.1.2 Agregados

Ambos os agregados, miúdo e graúdo, foram caracterizados quanto a distribuição granulométrica, massa específica real e massa unitária. Para o agregado miúdo também foi analisado o inchamento e a composição mineralógica. O agregado miúdo natural empregado na fabricação dos concretos foi areia lavada, e o agregado graúdo foi brita granítica, adquiridos no comércio local da cidade de Mossoró/RN.

3.1.2.1 Análise Granulométrica

Determinou-se a granulometria dos agregados utilizando-se a ABNT NBR NM 248/2003.

Figura 6: Determinação da composição granulométrica por peneiramento



Fonte: Autora (2019).

3.1.2.2 Massa Específica Real e Massa Unitária

A massa específica real do agregado miúdo foi determinada seguindo-se os procedimentos descritos na ABNT NBR NM 52/2009. E para o agregado graúdo seguiu-se a ABNT NBR NM 53/2009. A determinação da massa unitária dos agregados seguiu-se o prescrito na ABNT NBR NM 45/2006.

3.1.2.3 Inchamento

O coeficiente de inchamento do agregado miúdo foi caracterizado conforme a ABNT NBR 6467/2006.

3.1.3 Resíduo do Polimento do Porcelanato

O RPP passou por tratamento físico antes do processo de caracterização. O processo consistiu em moagem por um período de 30 minutos em moinho de jarros, com posterior peneiramento na peneira com abertura de 0,075 mm. A Figura 7 apresenta o RPP.

Figura 7: Resíduo do polimento do porcelanato



Fonte: Autora (2019).

3.1.3.1 Massa Específica Real

A massa específica real do RPP foi determinada através da picnometria, utilizando a água como o líquido de densidade conhecida para calibração do frasco.

3.1.3.2 Finura

A determinação da finura do RPP seguiu de acordo com o prescrito na ABNT NBR 16372/2015, descrita no item 3.1.1.2.

3.1.3.3 Composição Mineralógica

A composição mineralógica foi caracterizada através de Difractometria de raios-X (DRX). O equipamento empregado na investigação da DRX foi o da marca Shimadzu, modelo LAB X XRD 6000. Foram realizadas varreduras com goniômetro de ângulo 2θ à razão de 2° por minuto e intervalo de medida na faixa de 10° à 80° .

3.1.3.4 Composição Química

A composição química foi determinada de forma análoga ao item 3.1.1.5.

3.1.3.5 Perda ao fogo

A perda ao fogo foi determinada de forma análoga ao item 3.1.1.6.

3.1.3.6 Índice de Atividade Pozolânica

Para a verificação da atividade pozolânica, existem diversos métodos que podem ser aplicados. Os métodos químicos, ou diretos, baseiam-se na quantidade de hidróxido de cálcio fixado pela adição mineral. Há também os métodos indiretos, que se baseiam, por exemplo, em propriedades mecânicas, como o Índice de Atividade Pozolânica com cimento Portland ou cal hidratada.

Nesta presente pesquisa foram realizados três métodos de determinação do índice de atividade pozolânica, sendo estes o Índice de Atividade Pozolânica com cimento Portland, Método da Condutividade Elétrica e Método Chapelle Modificado.

3.1.3.6.1 Índice de Atividade Pozolânica com cimento Portland

A determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland deu-se de acordo com o estabelecido pela ABNT NBR 5752/2014. O ensaio consiste na razão entre a resistência média à compressão de uma argamassa tipo A e B. A argamassa tipo A é tomada como referência, com dosagem prescrita pela norma, enquanto que a argamassa B contém uma substituição de 25% em massa de cimento por material pozolânico.

O cimento empregado na realização deste ensaio foi o cimento Portland CP II-F-32 da marca Montes Claros. A Figura 8 apresenta o rompimento do corpo de prova para determinação do índice de atividade pozolânica com o cimento Portland aos 28 dias.

Figura 8: Determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland



Fonte: Autora (2019).

3.1.3.6.2 Método Chapelle Modificado

O procedimento foi realizado de acordo com o descrito na ABNT NBR 15895/2010. O método consiste em manter uma solução de 250 mL de água isenta de dióxido de carbono, 2,0 g de óxido de cálcio e 1,0 g do material pozolânicos, sob banho-maria à temperatura de 90 °C e com agitação durante um período de 16 horas. Ao final, cerca de 50 mL da solução é titulada com HCl 0,1 M, estimando-se a quantidade de óxido de cálcio fixado por grama de material pozolânico. Raverdy *et al.* (1980), estabeleceram que para que o material seja considerado pozolânico, o teor de fixação de hidróxido de cálcio deve ser superior a 436 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de adição.

Devido a indisponibilidade de equipamento de banho-maria com agitação, foi utilizado um banho-maria sem agitação, sendo este da marca Centauro, modelo CBM-08 (Figura 9).

Figura 9: Amostras em banho-maria à 90 °C



Fonte: Autora (2019).

3.1.3.6.3 Método da Condutividade Elétrica

Luxán *et al.* (1989) propuseram um método de avaliação da atividade pozolânica de um material através da medição da condutividade elétrica de 200 mL de uma solução saturada de hidróxido de cálcio, com adição de 5,0 g do material que se deseja avaliar. A solução deve estar a temperatura de 40 °C, e a medição deve ser realizada durante 120 segundos. A indicação de pozolânicidade do material é dada de acordo com a diferença de condutividade dada entre a medida inicial e final do processo.

A Tabela 3 apresenta a classificação do material de acordo com a variação de condutividade elétrica (LUXÁN *et al.*, 1989).

Tabela 3: Classificação quanto a pozolanicidade do material de acordo com a condutividade elétrica

Classificação do material	Variação de condutividade ΔC (mS/cm)
Não pozolânico	$< 0,4$
Pozolanicidade moderada	$0,4 < \Delta C < 1,2$
Boa pozolanicidade	$> 1,2$

Fonte: Luxán *et al.* (1989).

As leituras de condutividade elétrica foram realizadas com 120s, 1200s e 7200s, afim de se obter maior acompanhamento sobre a variação. As medições foram obtidas com o Condutivímetro da marca Hach, modelo HG 40d.

Figura 10: Determinação do índice de atividade pozolânica pelo método da condutividade elétrica



Fonte: Autora (2019).

3.1.4 Resíduo da Scheelita

Para a avaliação da composição granulométrica, da massa específica real e massa unitária, utilizou-se dos mesmos procedimentos adotados para o agregado natural miúdo, descritos nos itens 3.1.2.1 e 3.1.2.2, respectivamente. A composição mineralógica, composição química e perda ao fogo foram determinadas de forma análoga ao RPP. A Figura 11 apresenta o resíduo da scheelita.

Figura 11: Resíduo da scheelita



Fonte: Autora (2019).

3.1.5 Água de Amassamento

Á água utilizada para a realização dos procedimentos desta pesquisa caracteriza-se como potável, atendendo aos requisitos mínimos de qualidade para não comprometer a qualidade dos concretos.

Na produção dos corpos de prova foi utilizada água potável do município de Mossoró/RN, sendo esta coletada nas instalações do LCC do IFRN.

3.1.6 Aditivo

Nesta pesquisa foi adotada a utilização do aditivo superplastificante de alto desempenho da MC - PowerFlow 1108, de densidade de $1,08 \text{ g/cm}^3$, cor marrom e dosagem recomendada de 0,2% a 0,5% sobre o peso do cimento.

3.2 DEFINIÇÃO DO TRAÇO DE CONCRETO

O traço utilizado nesta pesquisa foi determinado com base na pesquisa de Medeiros, Gurgel e Silva (2018), sendo adotado o traço unitário em massa apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Traço unitário em massa – concreto referência

Cimento	Areia	Brita	Relação a/c	Aditivo
1	1,65	2,2	0,4	0,005

Fonte: Autora (2019).

A quantidade de materiais utilizada na confecção dos 12 corpos de prova para cada traço de referência está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5: Quantitativo de materiais para a produção de 12 corpos de prova do traço referência

Cimento	Areia	Brita	Água	Aditivo	RPP	RS
9964,25 g	16441,01 g	21921,35 g	3985,70 g	49,82 g	-	-

Fonte: Autora (2019).

Para os traços com substituição, a quantidade de materiais utilizada na confecção dos 12 corpos de prova para cada está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6: Quantitativo de materiais para a produção de 12 corpos de prova do traço com substituição

Cimento	Areia	Brita	Água	Aditivo	RPP	RS
8535,76 g	3313,88 g	22092,56 g	4016,83 g	50,21 g	1506,31 g	13255,54 g

Fonte: Autora (2019).

3.3 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Todos os procedimentos a seguir foram realizados de acordo com a ABNT NBR 5738/2015.

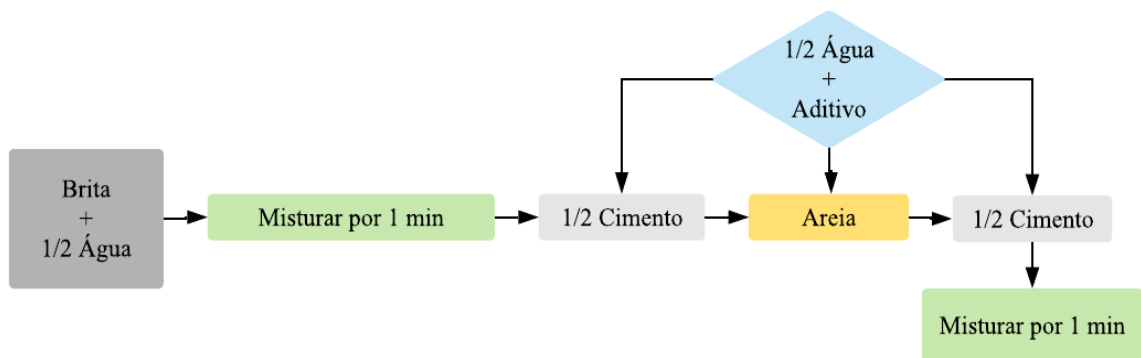
3.3.1 Moldes para corpos de prova

Foram utilizados moldes cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento, estando estes de acordo o prescrito na ABNT NBR 5738/2015, onde moldes cilíndricos devem ter altura igual ao dobro do diâmetro.

3.3.2 Fabricação dos corpos de prova

O processo de fabricação dos corpos de prova iniciou-se com a quantificação dos materiais, que foram previamente beneficiados por peneiramento e secagem em estufa à (105 ± 5) °C por 24 horas para retirada de umidade. Após a pesagem dos materiais, deu-se início a fase de mistura utilizando-se uma betoneira elétrica de eixo inclinado da marca Menegotti, com capacidade para 120 litros. As misturas para os concretos de referência foram executadas conforme o fluxograma apresentado na Figura 12.

Figura 12: Sequência de adição materiais na betoneira para preparo do concreto



Fonte: Autora (2019).

Destaca-se que o aditivo foi adicionado à fração de 1/2 da água, sendo estes adicionados a mistura aos poucos, a partir da adição de 1/2 do cimento Portland. Todo o processo de adição de materiais durou 5 minutos, com mais 1 minuto para homogeneização final.

Para a confecção dos concretos com substituição foi utilizada a mesma metodologia, com o diferencial de que o resíduo do polimento do porcelanato foi previamente misturado ao cimento, bem como o RS foi misturado à areia.

Após a fabricação dos concretos, os corpos de prova foram moldados e adensados manualmente. Durante as primeiras 24 horas, os corpos de prova permaneceram nos moldes, armazenados em local protegido das intempéries, sendo posteriormente desmoldados, identificados e colocados em processo de cura submersa em tanque com solução saturada de hidróxido de cálcio.

Figura 13: Confeção dos corpos de prova



Fonte: Autora (2019).

3.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

De acordo com o descrito na terceira etapa (Figura 2), os ensaios no estado fresco foram realizados após a confecção dos concretos e antes da moldagem dos corpos de prova. Avaliou-se a consistência conforme estabelece a ABNT NBR NM 67/1998.

Após a determinação do abatimento pelo *slump test*, classificou-se a consistência dos concretos de acordo com a Tabela 1.

Figura 14: Determinação da consistência pelo *slump test*



Fonte: Autora (2019).

A massa específica foi determinada seguindo-se os procedimentos presentes na ABNT NBR 9833/2008.

Figura 15: Determinação da massa específica no estado fresco



Fonte: Autora (2019).

3.5 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

Todas as propriedades avaliadas no estado endurecido estão representadas na Figura 3.

3.5.1 Resistência à Compressão Axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado consoante a ABNT NBR 5739/2018. Para a realização do ensaio foi utilizada uma prensa elétrica com módulo eletrônico da marca EMIC, modelo PC 200 C.

Para cada dosagem de concreto analisada, foram ensaiados três corpos de prova com 28 dias de cura, totalizando doze corpos de prova. Antes de serem ensaiados, os corpos de prova foram retificados de forma a proporcionar uma superfície perfeitamente regularizada.

Figura 16: Ensaio de resistência à compressão axial



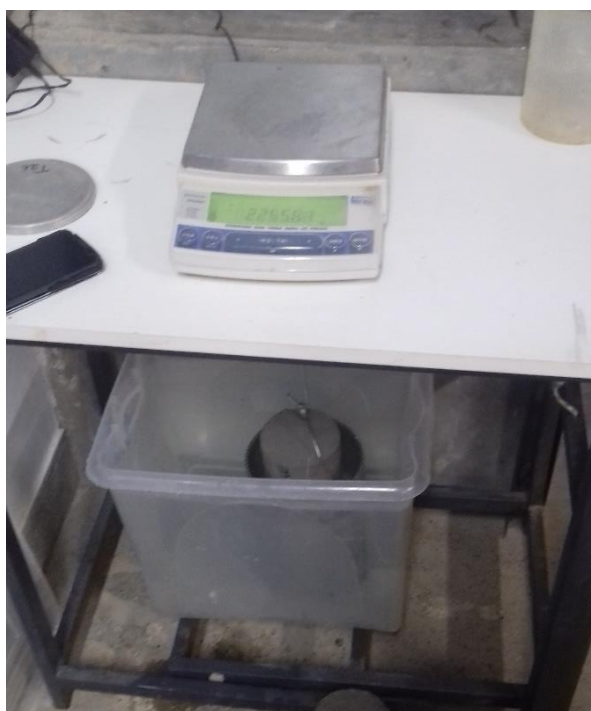
Fonte: Autora (2019).

3.5.2 Ensaio de Absorção e Porosidade

A porosidade e absorção dos concretos foi avaliada a partir da ABNT NBR 9778/2009. Para tanto, foram moldados três corpos de prova de cada composição, totalizando doze amostras para avaliação.

Após os 28 dias de cura, os corpos de prova foram retirados do tanque e passaram por secagem em estufa à (105 ± 5) °C durante o período de 72 horas. Posteriormente a retirada das amostras da estufa, registrou-se suas massas. Em seguida, os corpos de prova foram imersos em água à temperatura de (23 ± 2) °C durante igual período de 72 horas.

Figura 17: Obtenção do peso submerso do corpo de prova



Fonte: Autora (2019).

3.5.3 Ensaio de Absorção por Capilaridade

A absorção por capilaridade foi medida de acordo com as condições estabelecidas pela ABNT NBR 9779/2012. Foram moldados três corpos de prova para cada dosagem, sendo ensaiados após 28 dias de cura.

As amostras foram retiradas do tanque de cura e permaneceram em estufa à (105 ± 5) °C durante 24 horas. Após a retirada da estufa, os mesmos foram pesados e anotadas as suas respectivas massas. Os corpos de prova foram posicionados sobre suportes em recipiente

preenchido com água, com lâmina d'água de 5 mm. Foram determinadas as massas das amostras com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, contadas a partir da colocação destas em contato com a água.

Finalizada esta etapa, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral para observação da distribuição de água em seu interior.

Figura 18: Corpos de prova em ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: Autora (2019).

3.5.4 Ensaio de Ultrassom

Utilizou-se o ensaio não destrutivo de ultrassom para avaliar a qualidade do concreto em termos de uniformidade, ausência de vazios e fissuras internas. O procedimento foi realizado de acordo com a ABNT NBR 8802/2013 e com a ASTM C597-16.

O aparelho utilizado foi o da Matest, modelo C369N, com dois transdutores de 55 kHz. Os corpos de prova foram submetidos a frequência ultrassônica de forma direta, com aplicação de vaselina sólida nas faces dos corpos prova para melhor obtenção dos resultados. A partir do tempo de propagação da onda em cada corpo de prova, calculou-se a velocidade de propagação da onda de acordo com o comprimento do corpo de prova. Então, de acordo com a velocidade

de propagação das ondas, classificou-se qualidade dos concretos conforme a Tabela 7, apresentada por Whitehurst (1951) *apud* Qarsawi (2000).

Tabela 7: Classificação da qualidade do concreto pela velocidade do pulso ultrassônico

Velocidade do pulso ultrassônico (m/s)	Qualidade do concreto
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V \leq 4500$	Ótimo
$3000 < V \leq 3500$	Bom
$2000 < V \leq 3000$	Regular
≤ 2000	Ruim

Fonte: Whitehurst (1951) *apud* Qarsawi (2000).

Também utilizou-se da velocidade de propagação do pulso ultrassônico para determinar o módulo de elasticidade dinâmico das amostras conforme a Equação 1, apresentada na ASTM C597-16.

$$E = \frac{(\rho \times (1 + \nu) \times (1 - 2\nu)) \times V^2}{(1 - \nu)} \quad (1)$$

Onde:

ρ é densidade de massa no estado endurecido (kg/m^3);

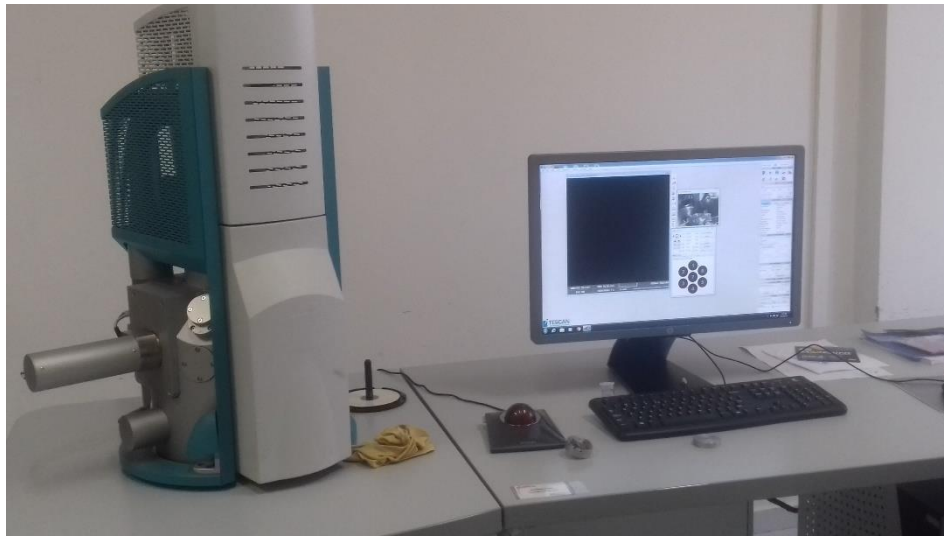
V é a velocidade que a onda ultrassônica leva para percorrer o corpo de prova no sentido longitudinal (km/s);

ν é o coeficiente de Poisson (de 0,2 a 0,35).

3.5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

A visualização em microscópio eletrônico de varredura foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica da UFERSA, utilizando-se o aparelho da marca TESCAN, modelo VEGA 3 LMU.

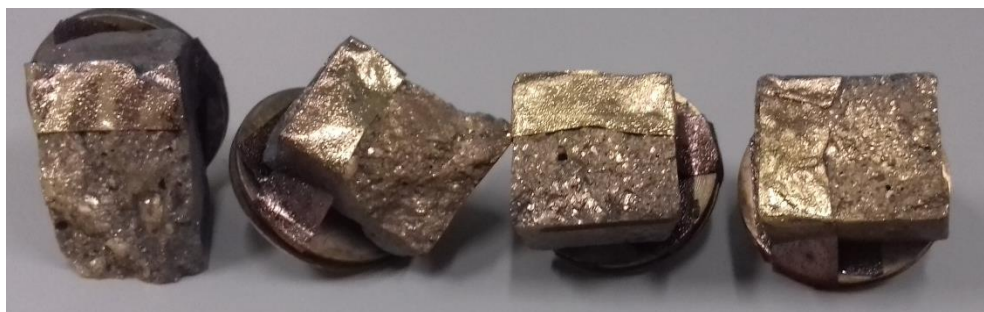
Figura 19: Equipamento para realização do MEV



Fonte: Autora (2019).

Inicialmente as amostras foram submetidas a um processo de criogenia em banho com nitrogênio líquido durante dois minutos, para então serem cortadas em cubos de dimensões de 2 cm x 2 cm x 2 cm, sendo posteriormente secos em estufa à $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por um período de 24 horas. As amostras passaram então por processo de metalização com ouro para aumentar o contraste da visualização (Figura 20). A metalização foi realizada no equipamento Quorum, modelo Q150R ES. A espessura do filamento de ouro utilizado na metalização era de 6 nm.

Figura 20: Amostras de concreto metalizadas com ouro



Fonte: Autora (2019).

Para todas as amostras analisadas, utilizou-se os seguintes critérios:

- a) Inicialmente foi realizada uma visualização geral das amostras com amplitude de 50 vezes;

- b) Seguiu-se com ampliações de 100 a 500 vezes procurando-se identificar as fases da pasta de cimento e dos agregados;
- c) A partir da identificação da zona de transição, foram realizadas amplitudes de 1000 a 3000 vezes para melhor visualização dessa fase;
- d) Com amplitudes variando entre 5000 a 7000 vezes, observou-se fases características das amostras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais presentes na primeira etapa do processo experimental. Posteriormente tem-se a apresentação dos resultados obtidos na terceira e quarta etapa.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Cimento Portland CP II-Z-32-RS

4.1.1.1 Caracterização Física e Mecânica

Na Tabela 8 são apresentadas as propriedades físicas e mecânicas avaliadas do cimento Portland CP II-Z-32-RS utilizado nesta presente pesquisa.

Tabela 8: Características físicas e mecânicas – Cimento Portland CP II-Z-32-RS

Características e Propriedades		Resultados	Limites
Massa específica (g/cm ³)		2,99	-
Superfície específica (cm ² /g)		3806	≥ 2600
Resíduo # 0,075 mm (%)		2,4	≤ 12
Início de pega (min)		80	≥ 60
Resistência à compressão	1 dia (MPa)	14,36	≥ 10
	7 dias (MPa)	22,42	≥ 20
	28 dias (MPa)	32,81	≥ 32

Fonte: Autora (2019).

Como pode ser observado, todas as propriedades do aglomerante analisado atendem aos requisitos mínimos normatizados.

4.1.1.2 Caracterização Química

A Tabela 9 apresenta a composição química do cimento CP II-Z-32-RS utilizado na pesquisa.

Tabela 9: Caracterização química do cimento CP II-Z-32-RS

Substância	Símbolo	Porcentagem (%)
Óxido de cálcio	CaO	50,19
Dióxido de silício	SiO ₂	26,88
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	11,25
Óxido de magnésio	MgO	4,45
Trióxido de enxofre	SO ₃	2,89
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	2,71
Óxido de potássio	K ₂ O	1,00
Dióxido de titânio	TiO ₂	0,31
Óxido de manganês	MnO	0,21
Outros	-	0,10
Perda ao fogo	-	3,02

Fonte: Autora (2019).

A composição química do cimento apresentada encontra-se de acordo com os requisitos normatizados. A perda ao fogo foi de 3,02%, valor inferior ao máximo estabelecido pela ABNT NBR NM 18/2012 de 6,5%.

4.1.2 Cimento Portland CP V ARI-RS

4.1.2.1 Caracterização Física e Mecânica

A Tabela 10 apresenta os resultados da caracterização física e mecânica do cimento Portland CP V ARI-RS também empregado nesta pesquisa.

Tabela 10: Características físicas e químicas – Cimento Portland CP V ARI-RS

Características e Propriedades		Resultados	Limites
Massa específica (g/cm ³)		3,06	-
Superfície específica (cm ² /g)		4688	≥ 3000
Resíduo # 0,075 mm (%)		1,2	≤ 6
Início de pega (min)		75	≥ 60
Resistência à compressão	1 dia (MPa)	16,26	≥ 14
	3 dias (MPa)	24,17	≥ 24
	7 dias (MPa)	34,19	≥ 34

Fonte: Autora (2019).

Verifica-se que todas as propriedades estudadas atendem aos parâmetros normatizados.

4.1.2.2 Caracterização Química

A Tabela 11 apresenta a composição química do cimento CP V ARI-RS.

Tabela 11: Composição química do cimento CP V ARI-RS

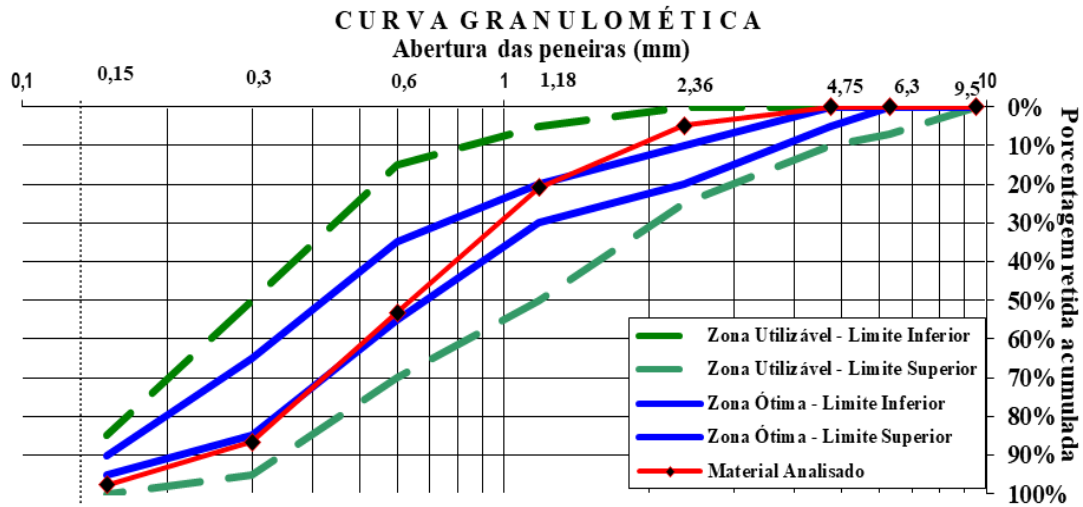
Substância	Símbolo	Porcentagem (%)
Óxido de cálcio	CaO	59,66
Dióxido de silício	SiO ₂	19,61
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	8,15
Óxido de magnésio	MgO	4,86
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	4,01
Trióxido de enxofre	SO ₃	2,10
Óxido de potássio	K ₂ O	1,09
Dióxido de titânio	TiO ₂	0,24
Óxido de manganês	MnO	0,19
Outros	-	0,10
Perda ao fogo	-	2,95

Fonte: Autora (2019).

4.1.3 Agregado Miúdo

A Figura 21 apresenta a curva granulométrica do agregado miúdo natural empregado na produção dos concretos. Observa-se que a granulometria da areia encontra-se totalmente dentro da zona utilizável, estando parcialmente inserida na zona ótima.

Figura 21: Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autora (2019).

Na Tabela 12 são expostos os resultados de caracterização do agregado miúdo conforme procedimento experimental. O material apresenta módulo de finura de valor médio, enquadrando-se no módulo de finura da zona ótima, que varia de 2,20 a 2,90, de acordo com a ABNT NBR 7211/2009.

Tabela 12: Características e propriedades do agregado miúdo

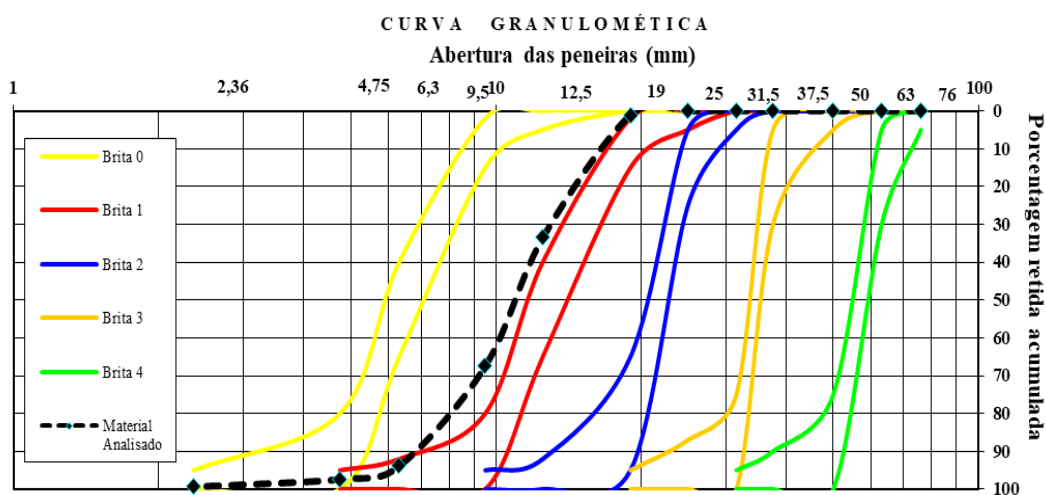
Ensaio		Resultados
Massa específica real (g/cm³)		2,59
Massa unitária (g/cm³)		1,48
Coeficiente de inchamento		1,16
Granulometria	Módulo de finura	2,63
	Dimensão máxima (mm)	2,36

Fonte: Autora (2019).

4.1.4 Agregado Graúdo

A curva granulométrica da brita granítica empregada como agregado graúdo utilizado na pesquisa encontra-se na Figura 22.

Figura 22: Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autora (2019).

A Tabela 13 apresenta os resultados de caracterização do agregado graúdo.

Tabela 13: Características e propriedades do agregado graúdo

Ensaio		Resultados
Massa específica real (g/cm^3)		2,67
Massa unitária no estado solto (g/cm^3)		1,85
Massa unitária no estado compacto (g/cm^3)		1,91
Absorção (%)		0,64
Granulometria	Módulo de finura	6,64
	Dimensão máxima (mm)	19

Fonte: Autora (2019).

A análise conjunta da Figura 22 com a Tabela 13 permite-nos concluir que a brita encontra-se na faixa de brita 1, com dimensão máxima do agregado de 19 mm.

4.1.5 Resíduo do Polimento do Porcelanato

4.1.5.1 Características Físicas

A Tabela 14 apresenta as características físicas do RPP. Como pode ser observado, sua massa específica é inferior a massa específica de ambos os cimentos utilizados na fabricação dos concretos. Enquanto que a superfície específica do RPP é superior à do cimento Portland CP II Z RS e CP V ARI RS. Ou seja, o RPP é um material de granulometria mais fina que o cimento, o que favorece sua adição em substituição parcial a massa do cimento.

Tabela 14: Características físicas do resíduo do polimento do porcelanato

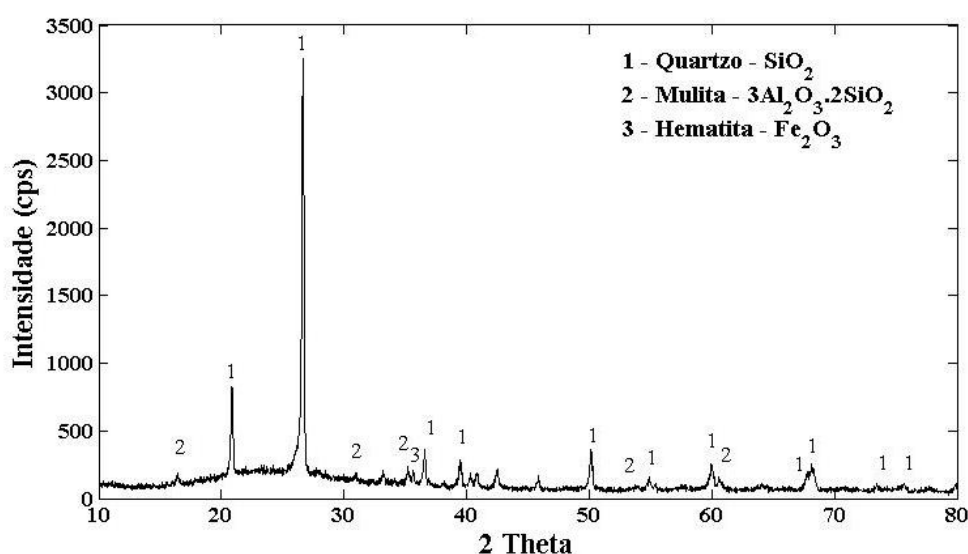
Ensaio	Resultados
Massa específica real (g/cm ³)	2,39
Superfície específica (cm ² /g)	8741

Fonte: Autora (2019).

4.1.5.2 Composição Mineralógica

A composição mineralógica do RPP foi determinada por ensaio de DRX e o resultado encontra-se demonstrado na Figura 23.

Figura 23: Composição mineralógica do resíduo do polimento do porcelanato



Fonte: Autora (2019).

As fases cristalinas presentes no RPP são preponderantemente quartzo e mulita, com presença menos representativa de hematita. Os resultados foram similares aos apresentados por Souza (2007) e Nascimento (2016), que descrevem que o quartzo e a mulita são minerais que compõem a massa porcelânica. Nascimento (2016) ainda destaca que o halo amorfo alongado e mais acentuado na região entre 20° e 30° indica que o resíduo é um material com potencial pozolânico reativo.

4.1.5.3 Composição Química

O resultado da análise química do RPP encontra-se na Tabela 15.

Tabela 15: Composição química do resíduo do polimento do porcelanato

Substância	Símbolo	Porcentagem (%)
Dióxido de silício	SiO ₂	63,94
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	22,79
Óxido de magnésio	MgO	7,09
Óxido de potássio	K ₂ O	3,87
Óxido de cálcio	CaO	1,10
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	0,81
Dióxido de titânio	TiO ₂	0,15
Óxido de manganês	MnO	0,13
Outros	-	0,12
Perda ao fogo	-	3,39

Fonte: Autora (2019).

A caracterização por espectrometria por fluorescência de raios-X do RPP apresenta maior quantidade de dióxido de silício e óxido de alumínio, com presença significativa de óxido de magnésio e óxido de potássio, contendo ainda outros óxidos em quantidade menores. Breitenbach *et al.* (2017) obteve resultados análogos, e com isso relatou que os elevados teores de dióxido de silício e óxido de alumínio são característicos da composição das argilas utilizadas na fabricação dos porcelanatos. De acordo com Souza (2007), a presença do óxido de magnésio é proveniente dos abrasivos utilizados durante o processo de polimento do porcelanato.

Ressalta-se que a somatória da porcentagem de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 é igual a 87,54%, sendo este valor superior ao mínimo exigido pela ABNT NBR 12653/2014, *Indian Standard IS 1344* e ASTM C-618, correspondente à 70% para pozolanas naturais e artificiais. A IS 1344 ainda estabelece que o percentual mínimo de SiO_2 é de 40%, CaO máximo de 10%.

Para a perda ao fogo, o resultado de 3,39% é inferior ao máximo estabelecido pela ABNT NBR 12653/2014 e pela ASTM C-618, correspondente a 10%. Também atende a IS 1344, que exige valor inferior a 5%. Silva (2005) encontrou resultado similar para perda ao fogo, assim como Jacoby e Pelisser (2015), que encontraram 3,8%.

E, apesar do DRX não ter sido quantitativo à respeito das fases cristalinas e amorfas, através do resultado da análise qualitativa é possível compará-lo ao resultado apresentado no FRX e constata-se que a presença predominante do dióxido de silício, representado em DRX pelo elevado pico de quartzo, assim como do óxido de alumínio, presente nos picos de mulita. Encontra-se ainda óxido de ferro apresentado no pico de hematita.

Carmo e Portella (2008) destacam que, embora a composição química não seja um parâmetro totalmente adequado para a avaliação da pozolanicidade, pois impossibilita a diferenciação entre as fases cristalina e amorfa, ela pode ser utilizada como indicador de possível pozolanicidade.

4.1.5.4 Atividade Pozolânica

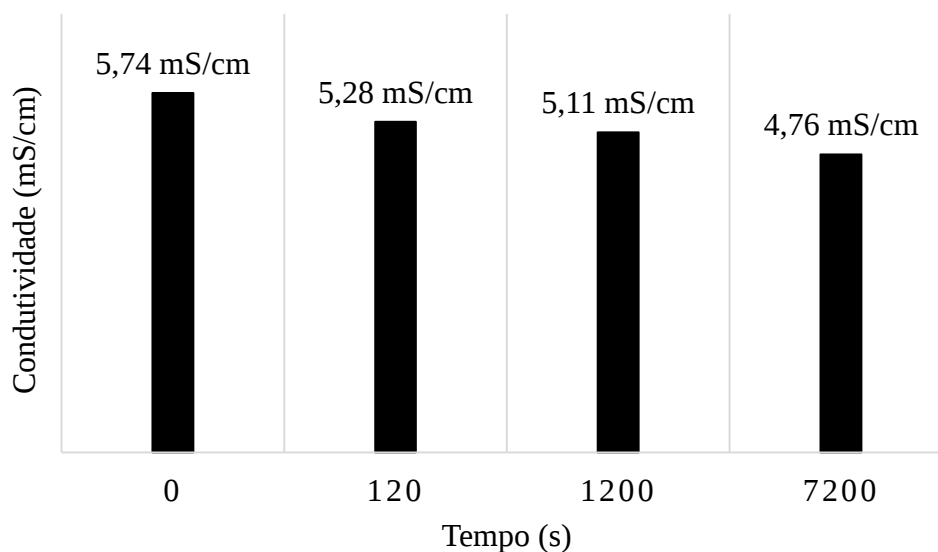
4.1.5.4.1 Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland

O potencial reativo do RPP determinado através do índice de atividade pozolânica com cimento Portland foi de 103%. Sendo este superior a 75%, pode-se classificar o RPP em estudo como sendo um material pozolânico de acordo com a ABNT NBR 12653/2014.

4.1.5.4.2 Método da Condutividade Elétrica

O método da condutividade elétrica também foi utilizado para a verificação do potencial pozolânico do RPP. Os valores de condutividade elétrica estão apresentados com os seus respectivos tempos de medição na Figura 24.

Figura 24: Determinação da condutividade elétrica em diferentes tempos de medição



Fonte: Autora (2019).

Conforme ilustra a Figura 24, a perda de condutividade elétrica é menor nos primeiros 120 segundos, quando comparada a perda com 7200 segundos. Rodrigues (2012), cita que o decréscimo da condutividade se dá com o desenvolvimento da reação pozolânica, com diminuição de íons Ca^{2+} devido ao aumento das fases de C-S-H. A diferença de condutividade entre a medição inicial e a com 120 segundos é de 0,46 mS/cm. A partir desta diferença e de acordo com a classificação de Luxán *et al.* (1989), o RPP apresenta-se como uma pozolana moderada. E a mesma classificação permanece para as medições de 1200 segundos e 7200 segundos.

4.1.5.4.3 Método Chapelle Modificado

O teor de hidróxido de cálcio fixado indica o potencial reativo pozolânico dos materiais. O RPP apresentou consumo de 574,11 mg/g (mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /g de pozolana), sendo este superior ao valor mínimo de 436 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /g de adição apresentado por materiais pozolânicos, proposto por Raverdy *et al.* em 1980 (RÊGO, 2015 *apud* SALUM, 2016).

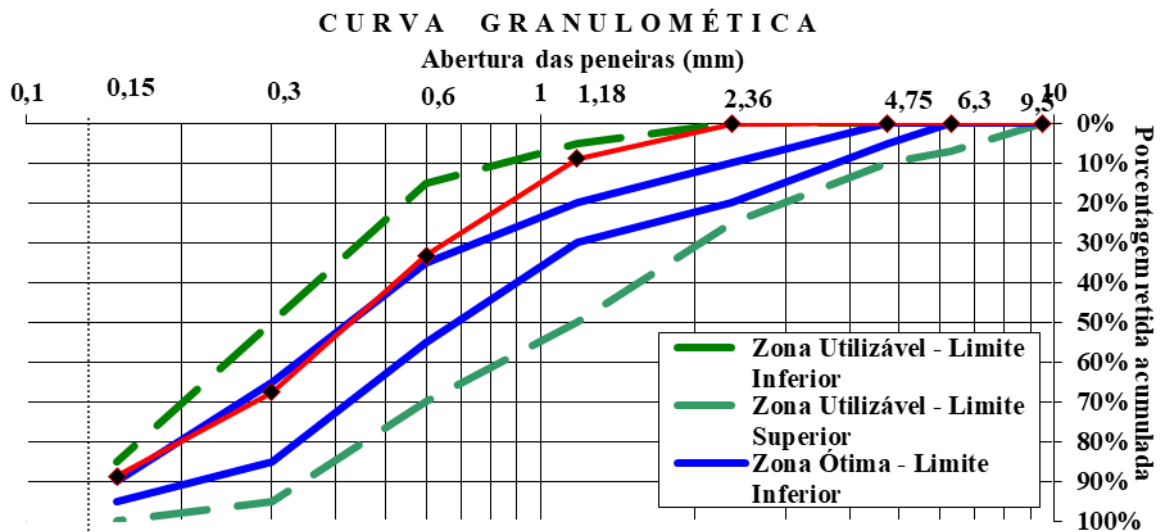
Cordeiro e Désir (2010) afirmam que elevados valores de superfície específica contribuem de forma positiva para o índice de atividade pozolânica pelo método de chapelle modificado.

4.1.6 Resíduo da Scheelita

4.1.6.1 Características Físicas

A caracterização física do RS grosso se deu conforme ensaios apresentados na metodologia. O resultados estão expostos na Figura 25 e na Tabela 16.

Figura 25: Curva granulométrica do resíduo da scheelita



Fonte: Autora (2019).

A curva granulométrica do RS encontra-se dentro da zona utilizável do agregado miúdo e, comparando-a com a Figura 21, pode-se perceber que o resíduo apresenta granulometria aproximada à da areia natural, com volume de finos (partículas inferiores à 0,15 mm) cerca de 5 vezes maior do que o da areia utilizada. Na Tabela 16 pode-se observar que o módulo de finura do RS é de 1,99, caracterizando-se como uma areia fina de acordo com a ABNT NBR 7211/2009. Estes resultados corroboram com outros estudos que utilizam o RS como substituição parcial do agregado miúdo, como Paiva (2013) e Medeiros (2016).

Tabela 16: Características e propriedades do resíduo da scheelita

Ensaio		Resultados
Massa específica real (g/cm ³)		2,94
Massa unitária (g/cm ³)		1,58
Granulometria	Módulo de finura	1,99
	Dimensão máxima (mm)	2,36

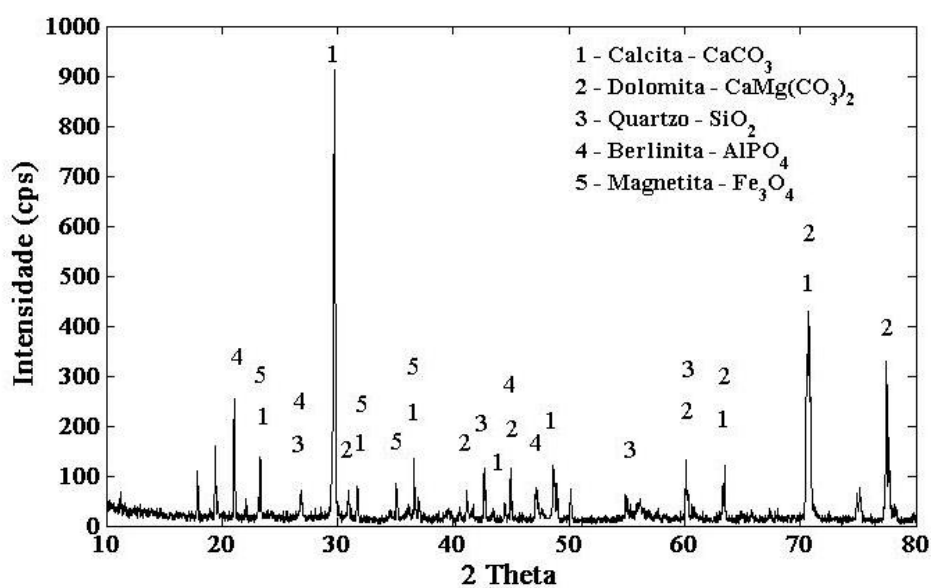
Fonte: Autora (2019).

Através dos resultados presentes na Tabela 16 para massa específica real e unitária do RS, constata-se que estas são 13,5% e 6,75% superiores à massa específica real e unitária da areia utilizada, respectivamente. Assim, o RS, embora possua menor módulo de finura, sua composição apresenta minerais que possuem valores médios destas propriedades superiores ao do agregado miúdo natural substituído.

4.1.6.2 Composição Mineralógica

A Figura 26 apresenta a composição mineralógica do RS, obtida por análise de DRX.

Figura 26: Composição mineralógica do resíduo da scheelita



Fonte: Autora (2019).

Analisando-se os picos dos minerais presentes na Figura 26, constata-se que há predominância de calcita, dolomita e quartzo, sendo a calcita com os maiores picos. Comparando-se os resultados com a composição mineralógica de outros autores, percebe-se certa diferenciação nos principais elementos encontrados. Essas diferenças se dão pelo fato do RS se constituir de grande variedade de rochas com composições diferentes, conforme explana Carlos (2018), que encontrou calcita e anortita como os principais minerais constituintes, enquanto Gerarb (2014) identificou calcita e quartzo.

4.1.6.3 Composição Química

Tabela 17: Composição química do resíduo da scheelita

Substância	Símbolo	Porcentagem (%)
Óxido de cálcio	CaO	39,23
Dióxido de silício	SiO ₂	35,20
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	14,95
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	7,65
Óxido de potássio	K ₂ O	1,25
Óxido de manganês	MnO	0,73
Dióxido de titânio	TiO ₂	0,49
Trióxido de tungstênio	WO ₃	0,16
Óxido de estrôncio	SrO	0,15
Outros	-	0,19
Perda ao fogo	-	14,89

Fonte: Autora (2019).

O resultado da caracterização química do RS mostra que o resíduo é composto predominantemente por óxido de cálcio e dióxido de silício, com porcentagem inferior de óxido de alumínio e óxido de ferro. Apresentando ainda óxido de potássio, de manganês e de titânio em proporções menores. A expressiva porcentagem de CaO e SiO₂ deve-se ao fato da região de localização da mina ser formada por rochas calcissilicáticas (MARANHÃO, 1970; CANO, COSTA E NESI, 2009).

A somatória das porcentagens de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ resultou em 57,80%, não atendendo ao requisito de possuir no mínimo 70% exigido pela ABNT NBR 12653/2014, IS 1344 e ASTM C-618, para caracteriza-lo como material pozolânico.

Associando-se os resultados da composição mineralógica apresentados na Figura 26 com o FRX, é possível visualizar a superior presença de cálcio, presente nos elevados picos de calcita no DRX e no óxido de cálcio apresentado pelo FRX. Tem-se ainda considerável quantidade de quartzo, e também a presença de alumínio nos picos de berlinita e no óxido de alumínio indicado na composição química.

Os resultados obtidos na análise química revelam proximidade com os resultados encontrados por Machado (2012), Paiva (2013) e Gerab (2014), diferindo de Fernandes (2011), que encontrou 51,41% de CaO e 21,53% de SiO₂.

A perda ao fogo para o RS foi de 14,89%. Fernandes (2011) determinou a perda ao fogo de 10%, enquanto Carvalho (2002) encontrou a média de 16,9% e Machado (2012) determinou ser de 13,84%. O valor de perda ao fogo foi superior ao mínimo estabelecido pela NBR 12653/2014, ASTM C-618 e IS 1344. Rodrigues (2012) afirma que materiais com elevado valor de perda ao fogo são menos vantajosos para a utilização como material pozolânico.

4.2 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

4.2.1 *Slump test*

Os valores de abatimento do tronco de cone se encontram na Tabela 18.

Tabela 18: Valores de abatimento de tronco de cone, em milímetros

Traço	<i>Slump</i> (mm)
REF CP II	100
T80/15 CP II	75
REF CP V	75
T80/15 CP V	50

Fonte: Autora (2019).

Os traços com substituições apresentaram redução na trabalhabilidade, com menor resultado para o *slump test*. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato da mistura conter maior quantidade de finos, haja vista que o RS apresenta granulometria mais fina do que a areia, assim como o RPP também apresenta maior superfície específica do que o cimento Portland CP-II-Z-32-RS e CP ARI-RS. O mesmo comportamento foi observado nas pesquisas de Silva

(2005) e Barroso (2011). Alves *et al.* (2014) expõem que a incorporação de resíduos cerâmicos afetam negativamente a trabalhabilidade de concretos.

De acordo com os valores de abatimento encontrados, os concretos podem ser classificados como de consistência plástica, segundo a Tabela 1. Este tipo de concreto pode ser aplicado em estruturas usuais de concreto ou estruturas que possuam elevada densidade de armadura. A ABNT NBR 5738/2015 ainda classifica estes concreto como S50, com abatimento de 50 a 100 mm, podendo ser adensado de forma mecânica ou manual.

4.2.2 Massa Específica

Os resultados da massa específica dos concretos no estado fresco encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19: Massa específica dos concretos no estado fresco

Traço	Massa específica (g/cm ³)
REF CP II	2,40
T80/15 CP II	2,44
REF CP V	2,45
T80/15 CP V	2,47

Fonte: Autora (2019).

Observa-se que para traços com substituição, há aumento na massa específica do concreto no estado fresco quando comparada aos traços tomados como referência. Esse aumento deve-se a substituição parcial da areia pelo RS, que possui maior valor de massa específica comparada a da areia.

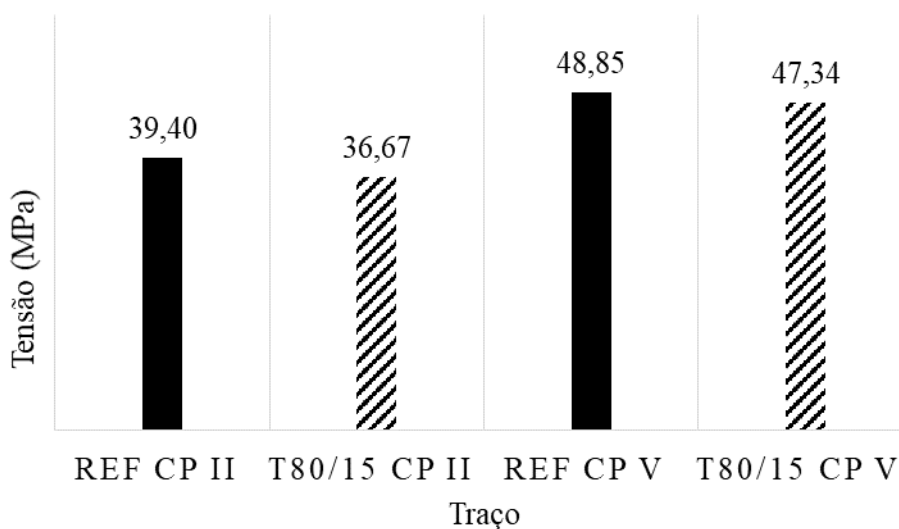
Embora a massa específica do RPP seja inferior a massa específica de ambos os cimentos, a fração de substituição pelo RS apresenta maior influência na massa específica do concreto, que pode ser justificada pela maior porcentagem de substituição da areia (80%) do que do cimento (15%).

4.3 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Resistência à Compressão Axial

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias encontram-se expostos na Figura 27.

Figura 27: Representação gráfica dos valores de resistência à compressão axial



Fonte: Autora (2019).

A resistência à compressão axial para os concretos com o cimento Portland CP II-Z-32-RS foi de 39,40 MPa para o traço referência e de 36,67 MPa para o traço com substituição, o que significa uma redução de aproximadamente 7,4% na resistência à compressão. Para os concretos com o cimento Portland CP V ARI-RS com traço de referência, a resistência foi de 48,85 MPa, com redução de cerca de 3,2% para a resistência do traço com substituição de 47,34 MPa.

Ainda que se observe uma redução na resistência à compressão axial, verifica-se que a substituição parcial da areia pelo resíduo da scheelita e do cimento pelo resíduo do polimento do porcelanato de forma simultânea, é satisfatória para os concretos ensaiados aos 28 dias, a julgar pela baixa redução da propriedade estudada.

Moraes (2001) relata que as adições minerais podem atuar de forma a reduzir ou incrementar a resistência mecânica do concreto, a depender a porcentagem de substituição, da

resistência do traço e da idade dos corpos de prova ensaiados. O autor ainda expõe que a influência positiva das adições minerais na resistência mecânica do concreto costuma se dar após os 91 dias de cura, onde tem-se maior efeito das reações pozolânicas.

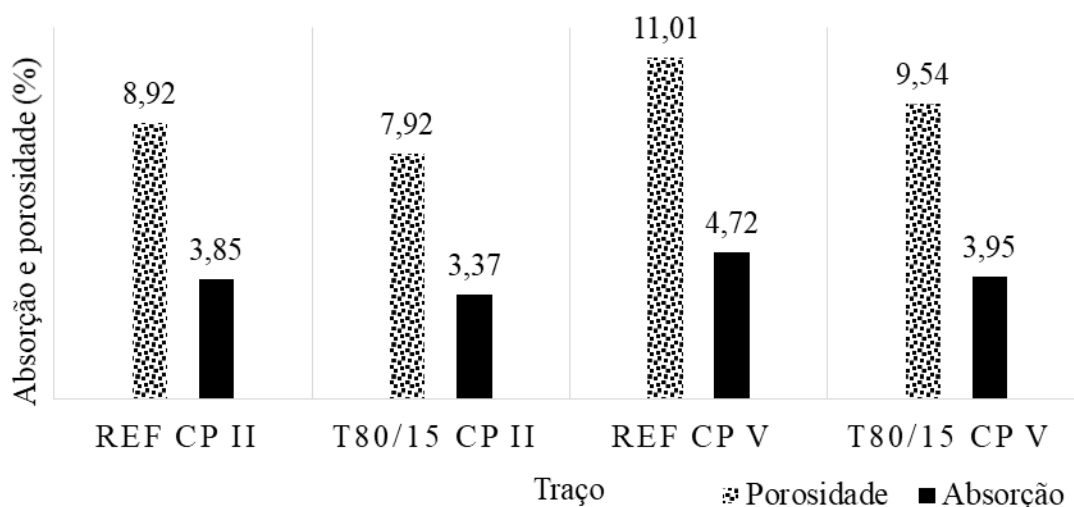
Jacoby e Pelisser (2015) constataram que a substituição do cimento por RPP não afeta o comportamento mecânico dos corpos de prova com 28 dias de idade. Paiva (2013) também constatou redução não significativa na resistência à compressão de concretos com substituição de 80% da massa de areia pelo RS.

Outro fator a ser observado é que os concretos produzidos com o cimento Portland CP V ARI-RS apresentaram maior resistência à compressão axial quando comparados com os produzidos com o cimento Portland CP II-Z-32-RS. Magalhães (2007) justifica que tal fato pode ser devido o cimento Portland CP V ARI-RS apresentar maior superfície específica, contribuindo com as reações pozolânicas, além de conter maior teor de clínquer em sua composição.

4.3.2 Absorção e Porosidade

A absorção e a porosidade são propriedades relacionadas a durabilidade do concreto. Concretos com estrutura mais compactada e menos vazios apresentam menores índices de absorção e porosidade, tornando-se mais impermeáveis e, com isso, menos susceptíveis a patologias, mantendo suas propriedades de serviço por mais tempo. Os resultados da Figura 28 mostram uma redução na absorção e na porosidade dos traços com substituição em relação aos referências.

Figura 28: Representação gráfica dos valores de absorção e porosidade



Fonte: Autora (2019).

Para o concreto com aglomerante do tipo cimento Portland CP II-Z-32-RS, a redução na porosidade foi de 11,2% e na absorção de 12,5%. E para o concreto com cimento Portland CP V ARI-RS a porosidade reduziu em 13,4% e a absorção em 16,3%. Esse comportamento pode ser explicado pelo preenchimento dos vazios dos concretos com as partículas finas presentes no RS e no RPP.

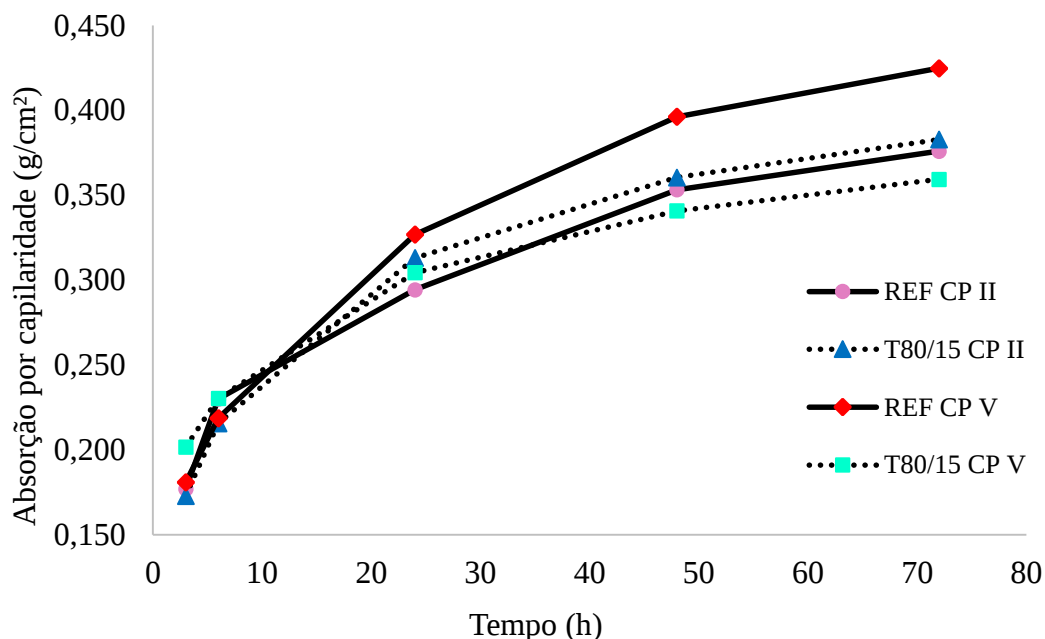
Além disso, ressalta-se o efeito das reações pozolânicas do RPP com o hidróxido de cálcio. Como demonstrado anteriormente, o RPP apresenta-se na mistura como um material pozolânico, favorecendo o preenchimento dos microporos e diminuição da permeabilidade.

As propriedades citadas foram semelhantes às encontradas por Paiva (2013), Nascimento (2016), Colangelo *et al.* (2016) e Sampaio, Martinelli e Gomes (2017).

4.3.3 Absorção por Capilaridade

A quantidade de água absorvida por unidade de área do concreto em função do tempo de imersão para os diferentes traços está representada na Figura 29.

Figura 29: Representação gráfica da absorção por capilaridade ao longo do tempo



Fonte: Autora (2019).

Analisando-se a Figura 29, verifica-se que nas primeiras 12 horas o traço T80/15 CP V apresentaram maior absorção de água por capilaridade, enquanto os demais traços apresentaram valores mais aproximados. A partir das 12 horas, começamos a perceber que o traço REF CP V aumenta a taxa de absorção, passando a ser o traço com maior absorção de água. Com 48 horas de imersão, o traço T80/15 CP V assume os menores valores de absorção capilar, assim permanecendo até a finalização das medições.

Arruda *et al.* (2018) também observou comportamento semelhante em concreto produzido com adição de sílica ativa, percebendo que nas primeiras 3 e 6 horas de imersão em água, a absorção capilar teve resultados bem parecidos, e a partir das 24 horas, percebe-se aumento na absorção capilar e, à medida que aumenta-se os teores de sílica no traço, nota-se menores valores de absorção.

4.3.4 Massa específica

Para a massa específica no estado endurecido, observa-se o mesmo comportamento obtido no estado fresco, sendo os concretos de traço T80/15 CP II e T80/15 CP V os com maiores massas específicas, conforme Tabela 20.

Tabela 20: Massa específica dos concretos no estado endurecido

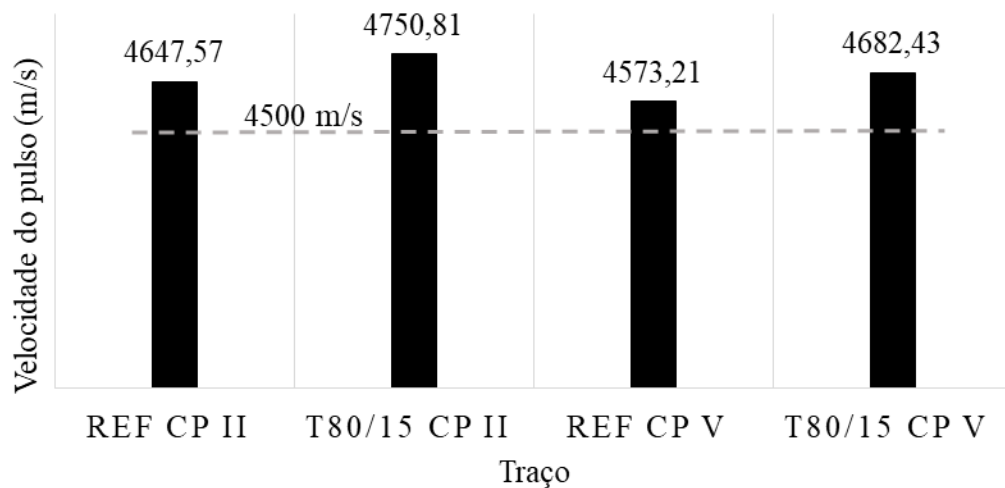
Traço	Massa específica (g/cm ³)
REF CP II	2,32
T80/15 CP II	2,35
REF CP V	2,27
T80/15 CP V	2,39

Fonte: Autora (2019).

4.3.5 Velocidade do Pulso Ultrassônico

A Figura 30 expõe a velocidade média de propagação do pulso ultrassônico para cada traço em estudo.

Figura 30: Representação gráfica da velocidade do pulso ultrassônico nos corpos de prova



Fonte: Autora (2019).

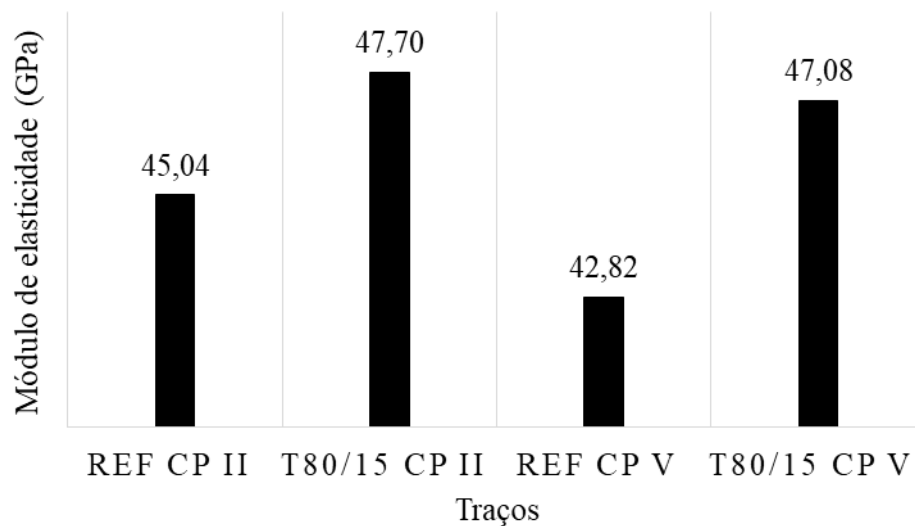
Como podemos observar, todos os traços estudados encontram-se com velocidade de propagação do pulso superior a 4500 m/s, podendo ser classificados como concretos de excelente qualidade, de acordo com a IS 13133 – 1.

A velocidade de propagação está inversamente proporcional relacionada a quantidade de vazios existente na estrutura. Esse comportamento pode ser verificado ao compararmos a Figura 28 com a Figura 30, onde nota-se que o traço T80/15 CP II foi o que apresentou menor porosidade e, conseqüentemente, maior velocidade do pulso. Pode-se ainda notar comportamento contrário no traço REF CP V, que apresentou a maior porcentagem de porosidade e a menor velocidade do pulso.

4.3.6 Módulo de Elasticidade Dinâmico

Com a velocidade do pulso ultrassônico, utilizou-se da Equação 1 para determinar o módulo de elasticidade dinâmico dos concretos. Mudanças no módulo de elasticidade afetam o comportamento das estruturas no que diz respeito a capacidade de deformação. A influência da substituição parcial da areia e do cimento por RS e RPP, respectivamente, no módulo de elasticidade está mostrada na Figura 31.

Figura 31: Representação gráfica do módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Autora (2019).

Para os concretos que apresentam o RS e do RPP na composição, verifica-se um aumento no módulo de elasticidade dinâmico, comparando-os aos concretos sem substituição.

Esse mesmo comportamento foi observado por Siddique (2003) e Medeiros (2016), que afirmam que o aumento no módulo de elasticidade promove maior rigidez, permitindo submeter maiores tensões ao material, com menores deformações. Gupta, Chaudhary e Sharma (2014) e Alves *et al.* (2014) ressaltam que a mudança no comportamento elástico do concreto se dá principalmente em função da relação água/cimento da mistura, que geralmente é aumentada quando se tem a utilização de resíduos. Esse aumento promove diminuição no módulo de elasticidade.

Os autores acima citados encontram decréscimo no módulo de elasticidade dinâmico a medida que substituíram o agregado miúdo natural por resíduo da borracha e resíduo de cerâmica (tijolos e material sanitário), respectivamente.

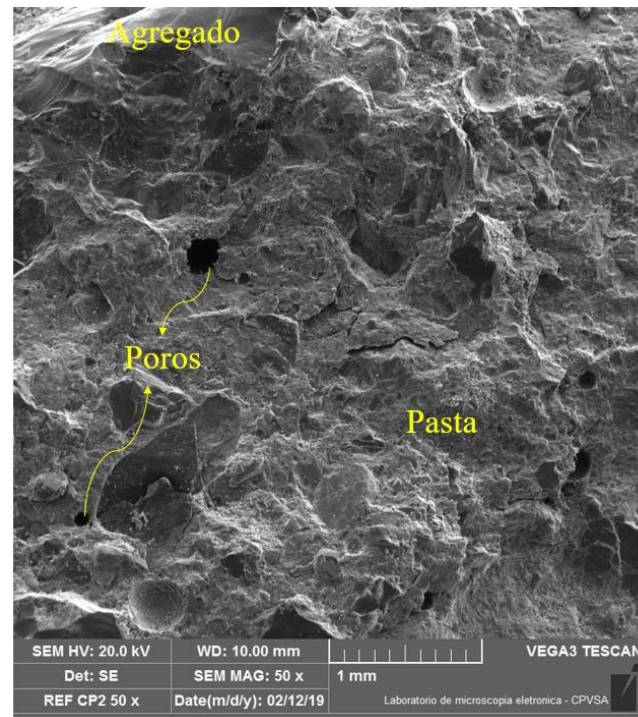
Silva (2006) cita que o aumento de material pulverulento promove maior grau de empacotamento das partículas, com consequente aumento de densidade de massa, favorecendo o aumento do módulo de elasticidade. Esses fatos podem ser observados ao analisar-se os resultados obtidos de massa específica, que apresentou valores superiores aos concretos com substituições quando comparados aos referências, sendo este mesmo comportamento observado com relação ao módulo de elasticidade.

4.3.7 MEV

Conforme explanam Metha e Monteiro (2008), a microscopia eletrônica de varredura nos permite visualizar os três constituintes da microestrutura do concreto: pasta de cimento hidratada, agregado e zona de transição. Lasseuguette *et al.* (2018) afirmam que a reação de hidratação é dominada pela reação do silicato de cálcio, que produz hidróxido de cálcio (CH) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Ressalta-se que durante a realização da microscopia, não foi possível a realização da espectroscopia de energia dispersiva (EDS), logo, não há como se afirmar a composição exata da pasta de cimento hidratada. Todas as descrições de compostos das figuras referentes à microestrutura do concreto são tratadas como suposições. As Figuras 32 e 33 apresentam a microestrutura do concreto de traço REF CP II.

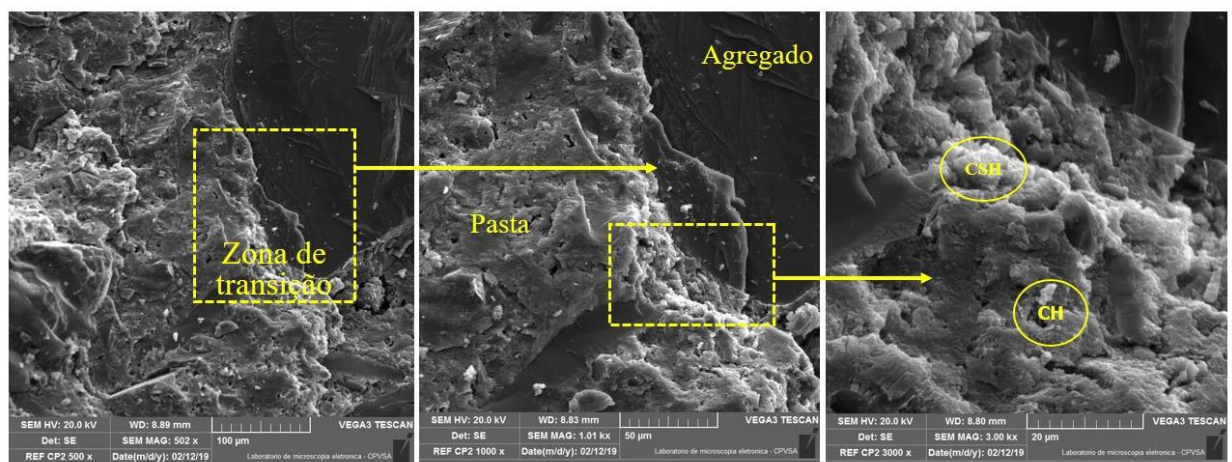
Figura 32: Microestrutura da amostra de concreto do traço REF CP II



Fonte: Autora (2019).

Na Figura 32 temos uma visualização geral da microestrutura, onde podemos distinguir o agregado da pasta hidratada, e ainda identificar a presença de alguns poros.

Figura 33: Aproximações da microestrutura do concreto REF CP II

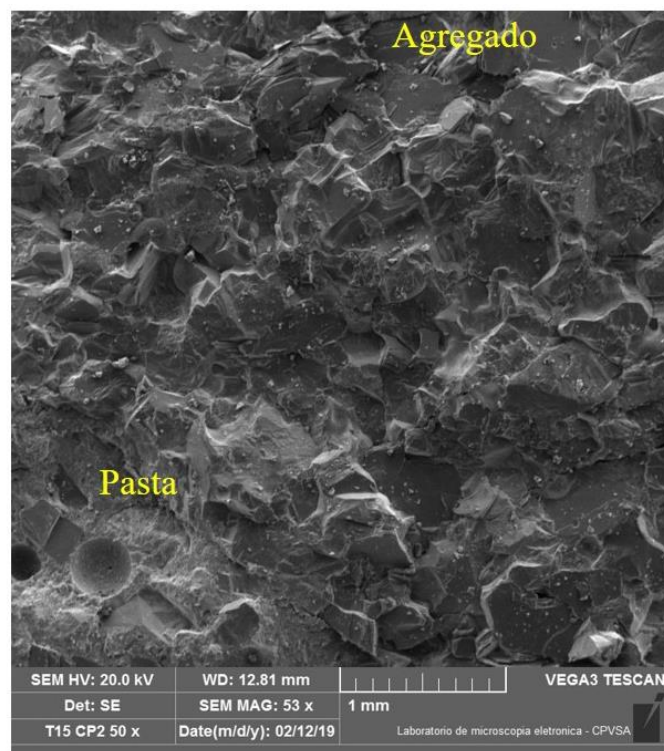


Fonte: Autora (2019).

Na Figura 33 temos a visualização da zona de transição entre pasta e agregado e, com aproximações, nota-se a existência de C-S-H e CH. O C-S-H apresenta-se com estrutura similar a gel e aglomerado, em formato esponjoso, rodeando as placas prismáticas de CH.

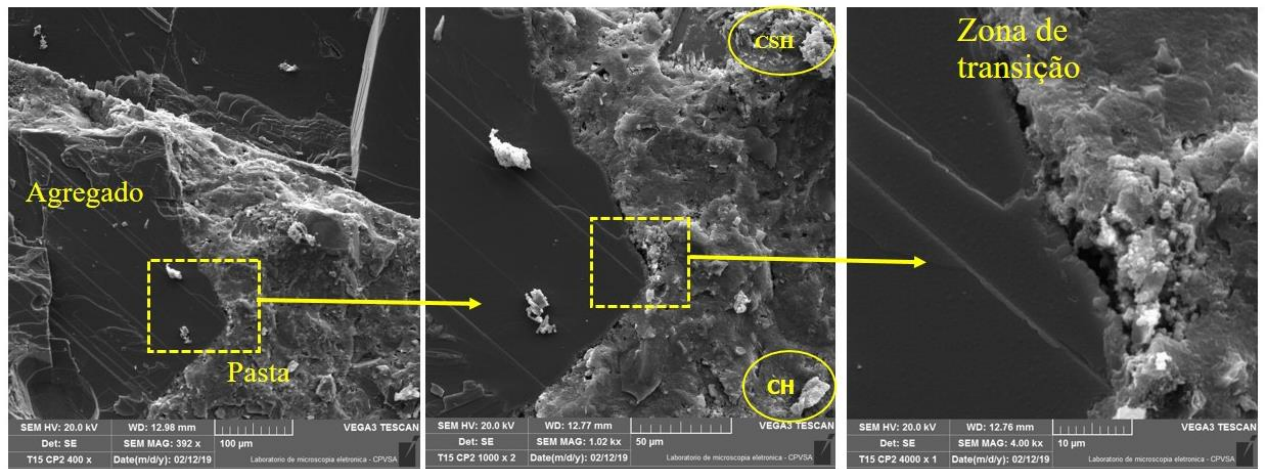
A Figura 34 apresenta uma visão geral da microestrutura do concreto de traço T80/15 CP II, onde nota-se grande quantidade de pasta de cimento hidratada e a presença de agregado. Comparando-se a Figura 32 com a Figura 34, nota-se que na segunda a pasta possui textura menos áspera, indicando estrutura menos porosa, corroborando com o resultado apresentado na análise de porosidade. Medina, Frías e Rojas, (2012), constatou mudança similar na porosidade da microestrutura, salientando que o efeito de redução da porosidade resulta em concretos menos susceptíveis ao ataque de agentes agressivos.

Figura 34: Microestrutura da amostra do concreto T80/15 CP II



Fonte: Autora (2019).

Figura 35: Aproximações da microestrutura do concreto T80/15 CP II

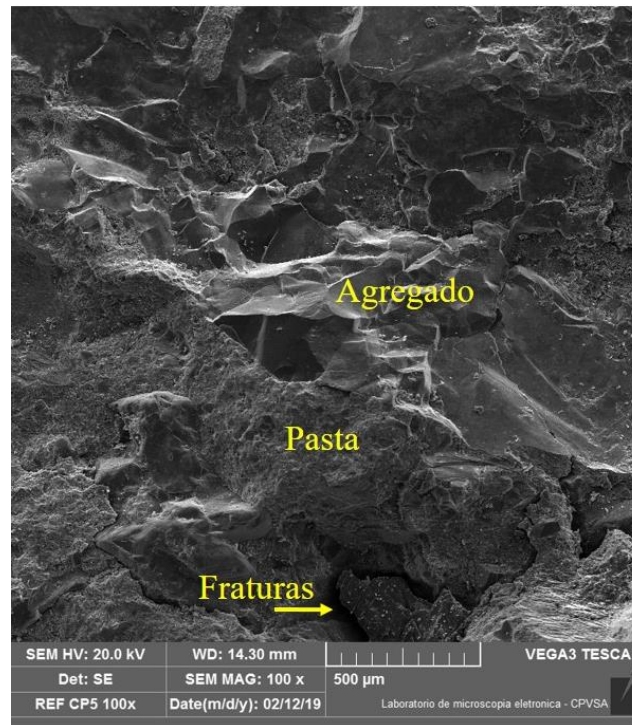


Fonte: Autora (2019).

Na Figura 35 é identificada a zona de transição, onde é possível notar a diferença existente entre a pasta de cimento hidratada próxima ao agregado, que apresenta aspecto mais poroso do que a matriz. Observa-se regiões de fraturas e deslocamento da pasta devido a frágil aderência na zona de transição. Nota-se ainda a presença de C-S-H e CH.

As Figuras 36 e 37 são referentes ao traço REF CP V. Na Figura 36 pode-se observar a presença do agregado, da pasta e também de uma região de fratura, possivelmente formada durante o processo de obtenção da amostra para a realização do ensaio.

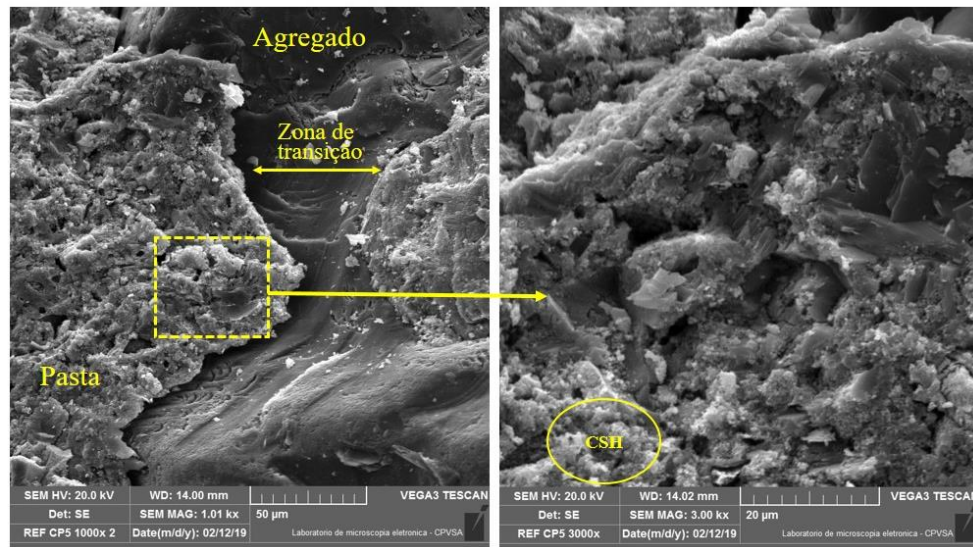
Figura 36: Microestrutura da amostra do concreto REF CP V



Fonte: Autora (2019).

Analisando-se a Figura 37, nota-se maior porosidade na pasta, como já se era esperado baseado no resultado do ensaio de absorção e porosidade. Observa-se ainda a presença de C-S-H, em quantidade mais significativa quando compara-se com as demais micrografias. Segundo Magalhães (2007), a presença de C-S-H resulta em maior resistência aos esforços mecânicos. Este fato se confirma com os resultados apresentados pelo ensaio de resistência à compressão, em que o traço REF CP V obteve os maiores valores de resistência.

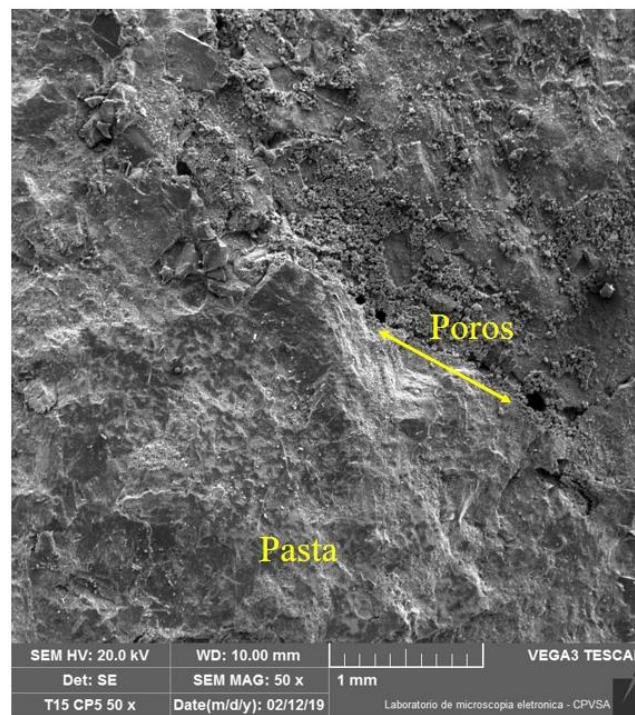
Figura 37: Aproximações da microestrutura do concreto REF CP V



Fonte: Autora (2019).

As Figuras 38 e 39 são referentes ao concreto de traço T80/15 CP V. Na Figura 38 nota-se essencialmente a pasta de cimento hidratada, com a presença de alguns poros.

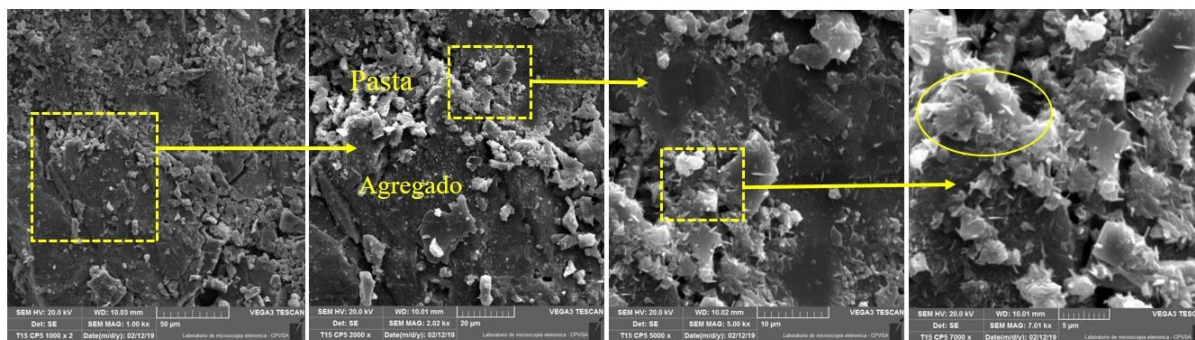
Figura 38: Microestrutura da amostra do concreto T80/15 CP V



Fonte: Autora (2019).

A partir da Figura 39 sugere-se a visualização do agregado e da pasta, bem como a formação do hidróxido de cálcio e de sulfoaluminato de cálcio, especialmente, a etriginta (em destaque). Tosun e Baradan (2010) afirmam que a detecção de sulfoaluminatos na microestrutura é difícil devido ao pequeno tamanho desses cristais.

Figura 39: Aproximações da microestrutura do concreto T80/15 CP V



Fonte: Autora (2019).

A diferença de porosidade mencionada entre as pastas de cimento hidratada dos diferentes traços também foi verificada por Silva (2005), que apontou uma microestrutura mais compacta, com poucos vazios para um concreto com substituição de 20% da massa de cimento por RPP. Enquanto que Paiva (2013) relatou que o formato retangular das partículas do RS não contribuem para a uniformidade da pasta. Gupta, Chaudhary e Sharma (2014) observaram comportamento semelhante com relação a zona de transição, ressaltando a dificuldade de ligação entre a face do agregado e a pasta hidratada.

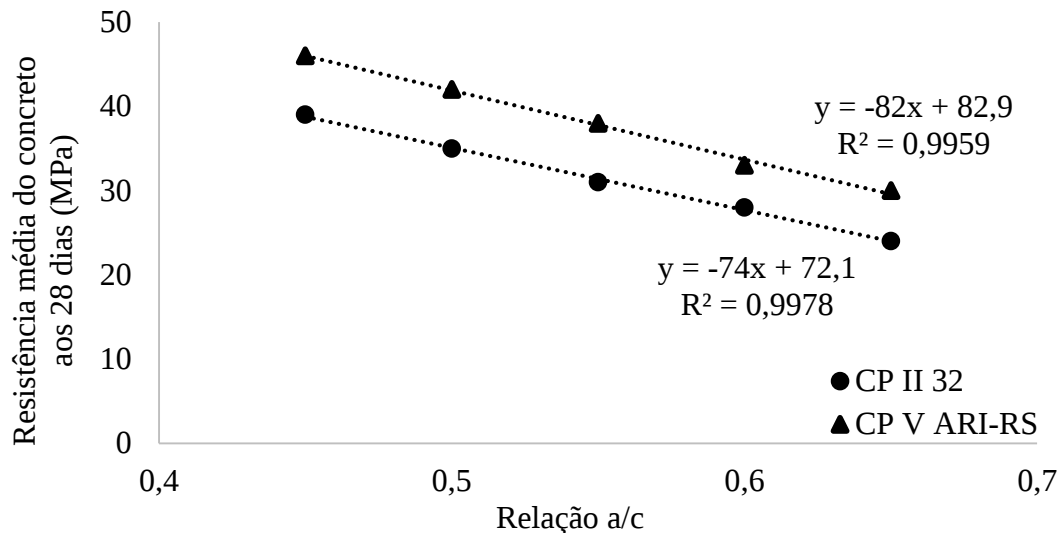
4.4 INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO NAS PROPRIEDADES AVALIADAS

Como pode-se observar, os concretos tomados como referência apresentam o mesmo traço, assim como ambos com substituições. Entretanto, nota-se diferença nas propriedades analisadas entre os próprios traços de referência e entre os traços com substituições.

Em conformidade com a Tabela 2, constata-se que o tipo de cimento promove variação na resistência de um dado concreto, para uma mesma relação de água/cimento. Adaptando-se a referida Tabela, tem-se os dados apresentados na Figura 40, referentes à resistência média do

concreto, em MPa, para a idade de 28 dias, especialmente para os cimentos do tipo CP II 32 e CP V ARI-RS, ambos aplicados na presente pesquisa.

Figura 40: Resistência média do concreto aos 28 dias para o cimento CP II 32 e CP V ARI-RS



Fonte: Adaptada de Isaia (2017).

Extrapolando-se linearmente os dados através da aplicação da equação resultante da linha de tendência dos dados, tem-se que, para o cimento CP II 32 e para a relação água/cimento de 0,4, obtém-se o valor médio de resistência de 42,5 MPa aos 28 dias. Para o traço REF CP II, a resistência média para a mesma idade foi de 39,40 MPa. A diferença entre a resistência estimada e obtida pode-se dar devido a alguns fatores, entre eles a própria incerteza gerada pela extrapolação, métodos de fabricação e moldagem dos corpos de prova, condições de cura e materiais utilizados.

Para o cimento CP V ARI-RS e com a mesma relação água/cimento de 0,4, extrapolando-se a linha de tendência dos dados, tem-se uma resistência estimada aos 28 dias de 50,1 MPa. Para o traço REF CP V, a resistência média obtida foi de 48,85 MPa. A diferença entre estimado e obtido pode ocorrer devido aos mesmos fatores apresentados no parágrafo anterior.

Tratando-se das divergências existentes entre as propriedades físicas de absorção e porosidade, Arruda *et al.* (2018) relatam em seu estudo que o cimento CP II-Z possui menor permeabilidade devido a presença de material pozzolânico em sua composição, o que não ocorre para o cimento CP V ARI-RS, que não possui adições pozzolânicas à sua massa. À vista disso,

espera-se que concretos fabricados com cimento CP-II-Z apresentem menor absorção e porosidade, confirmando os resultados apresentados pelos traços utilizados. A redução da permeabilidade do concreto favorece a sua durabilidade, dificultando a penetração de agentes agressivos à sua estrutura.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso racional das materiais primas utilizadas para produção de materiais de construção é essencial para o desenvolvimento sustentável. Uma das soluções para redução de consumo desses materiais é através da substituição destes por resíduos oriundos da indústria, como os agroindustriais, ou até mesmo da própria construção civil. A combinação do uso de resíduo com aplicações no setor construtivo traz benefícios para ambos, bem como para o meio ambiente.

A partir dessa pesquisa, pode-se verificar a viabilidade de substituições parciais simultâneas do agregado miúdo por resíduo da scheelita e do aglomerante cimento Portland por resíduo do polimento do porcelanato na mistura de concreto.

- O RS apresenta granulometria semelhante à da areia, com composição química preponderantemente formada por óxido de cálcio e dióxido de silício. O resíduo possui massa específica superior à da areia, a julgar pela presença de trióxido de tungstênio em sua composição.
- O RPP possui maior superfície específica do que o cimento, com composição química semelhante a de pozolanas naturais e artificiais, apresentando-se como um material com potencial pozolânico ativo, favorecendo as reações de hidratação do cimento.
- Para os concretos no estado fresco, a substituição simultânea de 80% da massa de areia por RS e de 15% da massa de cimento por RPP promovem redução na consistência, mas os mesmos ainda continuam com trabalhabilidade adequada. Também observa-se um aumento na massa específica destes.
- Para o estado endurecido, as substituições melhoram o desempenho dos concretos com relação a porosidade e absorção e, conseqüentemente, na uniformidade e qualidade dos concretos. Em termos de resistência à compressão, nota-se redução de aproximadamente 7% do traço referência com o cimento Portland CP II-Z para o traço com substituição. E redução de 3% para a resistência do traço com substituição com o cimento Portland CP V ARI-RS em relação ao traço referência.
- O emprego de diferentes tipos de cimento afeta diretamente nas propriedades mecânicas e físicas dos concretos. O cimento Portland CP ARI-RS favorece a propriedade de

resistência à compressão aos 28 dias, enquanto que o cimento Portland CP II-Z propicia redução na absorção e porosidade.

Desse modo, considerando as avaliações das propriedades supracitadas, pode-se concluir que a adição do RS e do RPP como substituição parcial da areia e do cimento, respectivamente, tem potencial de ser utilizada como forma de melhorar o desempenho do concreto, influenciando em sua durabilidade, conjuntamente com a redução de consumo de matérias primas e destinação sustentável dos resíduos.

REFERÊNCIAS

ABID, S. R.; NAHHAB, A.; AL-AAYEDI, H. K. H.; NUHAIR, A. M. **Expansion and Strength Properties of Concrete Containing Contaminated Recycled Concrete Aggregate**. Case Studies in Construction Materials, v. 9, 2018.

AFUM, B. O.; CAVERSON, D.; BEM-AWUAH, E. **A conceptual framework for characterizing mineralized waste rocks as future resource**. Internation Journal of Mining Science and Techonology, in press, 2018.

ALEXANDRIDOU, C.; ANGELOPOULOS, G. N.; COUTELIERIS, F. A. **Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants**. Journal Cleaner Production, v. 176, p. 745–757, 2018.

ALFONSO, P.; TOMASA, O.; VALLES, M. G.; TARRAGÓ, M.; MARTÍNEZ, S.; ESTEVES, H. **Potencial of tungsten tailings as glass raw materials**. Materials Letters, v. 228, p. 456-458, 2018.

ALVES, A. V.; VIEIRA, T. F.; BRITO, J.; CORREIA, J. R. **Mechanical properties os structural concrete with fine recycled ceramic aggregates**. Construction Building Materials, v. 64, p. 103-113, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS. **Annual Book of ASTM Standards** – Concrete and aggregates. V. 04.02. Philadelphia/PA, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS. **C597-16** Standard Test Method for Pulse velocity Through Concrete.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS. **C-618** Standard Specification for Coal Fly Ash And Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento do concreto**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. São Paulo/SP, 2005.

ARRUDA, F. F.; SILVA, D. L.; BENTO, A. J.; FONSECA, J. M. M. **Absorção por capilaridade em concreto produzido com adição de sílica ativa**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Maceió, Alagoas, 2018.

ASSI, L.; CARTER, K.; DEAVER, E.; ANAY, R.; ZIEHL, P. **Sustainable concrete: Building a greener future**. Journal of Cleaner Production, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579** Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582** Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653** Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15463** Placas cerâmicas para revestimento – Porcelanato. Rio de Janeiro, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1** Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372** Cimento Portland e outro materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18** Cimento Portland - Análise química – Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605** Cimento Portland e outro materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607** Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752** Materiais Pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118** Projetos de estruturas de concreto – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467** Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802** Cimento endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833** Concreto Fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248** Agregados – Determinação da composição granulométrica. 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 específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

BARBOSA, G.S. O desafio do desenvolvimento sustentável. **Revista Visões**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 4, jun. 2008.

BAGHEL, P. K.; NAGESH, D. S. **Mechanical properties and microstructural characterization of automated pulse TIG welding of dissimilar aluminum alloy**. Indian Journal of Engineering & Materials Scienses, v. 25, p. 147-154, 2017.

BARROS, L. M. **Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. São Carlos/SP, 2016.

BARROS, P. G. S. **Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Alagoas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Maceió/AL, 2008.

BARROSO, T. R. **Estudo da Atividade Pozolânica e da Aplicação em Concreto de Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar com Diferentes Características Físico-Químicas.** Dissertação de mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes/RJ, 2011.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção.** 5 ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 471 p.

BREITENBACH, S.B. *et al.* Adição de resíduo do polimento de porcelanato em argamassas de restauro à base de cal. **Cerâmica**, São Paulo, v. 63, n. 367, p. 395-401, set. 2017.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição de RCD.** Tese de doutorado. Universidade de São Carlos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. São Carlos/SP, 2007.

CANO, T. M.; COSTA, J. L.; NESI, J. R. **Tungstênio.** Sumário Mineral, 2017.

CARLOS, E. M. **Efeito da adição de resíduos de scheelita no comportamento térmico-mecânico e reológico de argamassas para engobes cerâmicos.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Natal/RN, 2018.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. **Cerâmica**, São Paulo, v. 54, n. 331, p. 309-333, 2008.

CARMO, J.B.M. **Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com sílica ativa e metacaulim face à resistência mecânica e a viabilidade econômica.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. Curitiba/PR, 2006.

CARVALHO, E. B., LIMA, R. F. S., PETTA, R. A., PAULO, J. B. A., SOUZA, L. C. **Caracterização de Rejeitos Provenientes da Usina de Beneficiamento do Minério da Mina Brejuí/RN.** XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Recife, 2002, vol. 1, p.75.

COELHO, M. A. M.; SILVA, M. G.; SOUZA, F. L. S.; SARMENTO, R.; ZANDONADE, E. **Avaliação ambiental de concreto com escória de alto forno ativada quimicamente após um ano de exposição em ambiente marinho.** XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, Florianópolis, Santa Catarina, 2006.

COLANGELO, F.; CIOFII, R.; LIGUORI, B.; IUCOLANO. **Recycled polylefins waste as aggregates for lightweight concrete.** Composites Part B, v. 106, 234-241, 2016.

CORDEIRO, G C.; DÉsir, J. M. Potencial de argila caulinítica de Campos dos Goytacazes, RJ, na produção de pozolana para concreto de alta resistência. **Cerâmica**, São Paulo, v. 56, p. 71-76, 2010.

COSTA FILHO, F. C. **Estudo de viabilidade técnica do uso de resíduos oriundos do beneficiamento de scheelita na composição de concretos asfálticos.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal/RN, 2017.

DASH, M. K.; PATRO, S. K.; RATH, A. K. **Sustainable use of industrial-waste as partial replacement of fine aggregate for preparation of concrete – A review.** International Journal of Sustainable Built Environment, v. 5, p. 484-516, 2016.

FELIX, E. F.; POSSAN, E. Balanço das emissões e da captura de CO₂ em estruturas de concreto: simulação em função do consumo e tipo de cimento. **Revista IBRACON**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 135-162, 2018.

FERNANDES, B. R. B. **Aproveitamento dos finos de scheelita utilizando concentração centrífuga e lixiviação ácida.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Recife/PE, 2011.

FERNANDES, J. R. R.; AMORIM, A. V. B. Concreto sustentável aplicado na construção civil. **Ciências Exatas e Tecnológicas**, Aracaju, v. 2, n. 1, p. 79-104, 2014.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. **Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete.** Construction and Building Materials, v. 22, 1675-1683, 2008.

GARCIA, E.; CABRAL JÚNIOR, M; QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F. Avaliação da atividade pozzolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, n. 331, p. 251-258, 2015.

GERAB, A. T. F S. C. **Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal/RN, 2014.

GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. **Assessment of mechanical and durability properties of concrete containig waste rubber tire as fine aggregate.** Construction Building Materials, v. 73, p. 562-574, 2014.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de cimento Portland.** IBRACON, São Paulo, 2010.

HOFFAMANN, A.T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre/RS, 2001.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concreto.** **Dissertação de mestrado.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre/RS, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. Gestão e manejo de resíduos de mineração. Brasília, 2016.

INDIAN STANDARDS, IS 13133 (Part 1). **Methods of Non-Destructive Testing of Concrete: Part 1 Ultrasonic Pulse Velocity.** Bureau of Indian Standards, New Delhi, 1992.

INDIAN STANDARDS, IS 1344. **Specification for calcined clay pozzolana.** Bureau of Indian Standards, New Delhi, 1982.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2017, v. 2.

JACOBY, P. C.; PELISSER, F. **Pozzolanic effect of porcelain polishing residue in Portland Cement**. Journal of Cleaner Production, v. 100, p. 84-88, 2015.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo/SP, 2000.

KETT, I. **Engineered concrete: mix design and test methods**. 2 ed. New York: CRC press. 2010. 230p.

KHAJURIA, C.; SIDDIQUE, R. **Use of iron slag as partial replacement of and to concrete**. Internacional Journal of Science, Engineering and Technology School Research, p. 1877–1880, 2014.

KRUGER, P.; SOUZA, A. B.; KONOFAL, W. U. Estudo de trabalhabilidade em argamassas e concretos com utilização de RCD. 8º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, Ponta Grossa/PR, 2013.

KUMAR, R. **Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete**. Construction Building Materials, v. 142, p. 248–255, 2017.

LASSEUGUETTE, E.; BURNS, S.; SIMMONS, D.; FRANCIS, E.; CHAI, H. K.; KOUTSOS, V. **Chemical, microstructural and mechanical properties of ceramic waste blended cementitious systems**. Journal of Cleaner Production, v. 211, p. 1128-1238, 2018.

LUXÁN, M.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. **Rapid Evaluation of Pozzolanic Activity of Natural Products by Conductivity Measurement**. Cement and Concrete Research. V. 19, p. 63-68, 1989.

MACHADO, T. G. **Estudo da adição de resíduo de scheelita em matriz cerâmica: formulação, propriedades físicas e microestrutura**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais. Natal/RN, 2012.

MAGALHÃES, A. G. **Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Belo Horizonte/MG, 2007.

MARANHÃO, R. **Geologia econômica da região de Currais Novos – RN**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 1970.

MARQUES, L. N.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; SANTANA, L. N. L.; LIRA, H. L.; FERREIRA, H. C. **Re-aproveitamento do resíduo do polimento de porcelanato para utilização em massa cerâmica**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 2, 34-42, 2007.

MEDEIROS, A. G.; GURGEL, M. T.; SILVA, W. G. **Propriedades de concreto sustentável produzido com pó do porcelanato e resíduo da scheelita**. Projeto de Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo de Água. Mossoró/RN, 2018.

MEDEIROS, M. **Estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal/RN, 2016.

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

MENEZES, R. R.; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Recycling of mine wastes as ceramic raw materials: an alternative to avoid environmental contamination**. Environmental Contamination, p. 199-220, 2012.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais – 3ª edição**. Ed. IBRACON. ISBN: 978-85-98576121. São Paulo, 2008.

MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO S.A. **História**. Disponível em <<http://minabrejui.com.br/site/historia/>>. Acesso em 10 nov. 2018.

MOHAMADALI, S. A. **Effect of properties of concrete using agro-waste as replacement of sand**. International Research Journal of Engineering and Technology, v. 4, n. 6, p. 2410-2415, 2017.

MORAES, R. C. **Efeitos físico e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Santa Maria/RS, 2001.

MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS, 2000.

NASCIMENTO, M.V.L.A. **Estudos de blocos intertravados de concreto para pavimentação com incorporação de resíduo do polimento do porcelanato**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Caruaru/PE, 2016.

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

OSSA, A.; GARCÍA, J. L.; BOTERO, E. **Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for pavement construction industry**. Journal of Cleaner Production, v. 33, p. 379-386, 2016.

PAIVA, E.H.G. **Avaliação do concreto de cimento Portland com resíduo da produção de scheelita em substituição do agregado miúdo**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal/RN, 2013.

PELISSER, F.; ZAVARISE, N.; LONGO, T. A.; BERNARIN, A. M. **Concrete made with recycled tire rubber: effect of alkaline activation and silica fume addition.** Journal of Cleaner Production, v. 19, p. 757–63, 2011.

PENG, K.; YANG, H.; OUYANG, J. **Tungsten tailing powders activated for use as cementitious material.** Powder Technology, v. 286, p. 678-683, 2015.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre/RS, 2006.

QASRAWI, H. Y. **Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted.** Cement and Concrete Research, v. 30, p. 739-746, 2000.

REGO, J. H. S. **As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento – aspectos de microestrutura das pastas.** Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Brasília/DF, 2004.

REK, W. J.; ZALEGOWSKI, K.; GARBACZ, A.; BISSONNETTE, B. **Properties of cement mortars modified with ceramic waste fillers.** Procedia Engineering, v. 108, p. 681-687, 2015.

RESENDE, W.V. **A influência de adições de escória de alto-forno e ardósia finamente moídas nas propriedades dos concretos.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Belo Horizonte/MG, 2012.

RODRIGUES, M. S. **Avaliação de cinzas de palha de cana-de-açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentícias.** Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Campinas/SP, 2012.

SALES, R. B. C.; BEZERRA, A. C. S.; KELES, K. C.; LANA, S. B.; AGUILAR, M. T. P. **Influência da basicidade da escória de alto forno como adição ao concreto.** XXXV Jornada Sul Americanas de Engenharia Estrutural, Rio de Janeiro, 2012.

SALUM, P. L. **Efeito da avaliação de temperatura sobre a resistência à compressão de concretos massa com diferentes teores de cinza volante.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis/SC, 2016.

SAMPAIO, Z. L. M.; MARTINELLI, A. E.; GOMES, T. S. Formulation and characterization of structural lightweight concrete containing residues of porcelain tile polishing, tire rubber and limestone. **Cerâmica**, São Paulo, v. 63, p. 530-535, 2017.

SEDIRA, N.; GOMES, J. C.; MAGRINHO, M. **Red clay brick and tungsten mining waste-based alkali-activated binder: Microstructural and mechanical properties.** Construction and Building Materials, v. 190, 1034-10488, 2018.

SHAFIGH, P.; MAHMUD, H. B.; JUMAAT, M. Z.; ZARGAR, M. **Agricultural wastes as aggregate in concrete mixtures – A review.** Construction Building Materials, v. 53, p. 110–

117, 2014.

SHANKS, W.; DUNANT, C. F.; DREWNIOK, M. P.; LUPTON, R. C.; SERRENHO, A.; ALLWOOD, J. L. **How much cement can we do without? Lessons from cement material flows in the UK.** Resources, Conservation and Recycling, v.141, p. 441-454, 2019.

SHARKAWI, A. M.; MOFTY, S. E. M. E.; SHOWAIB, E. A.; ABBASS, S. M. **Feasible construction applications for diferente sizes of recycled construction demoliton wastes.** Alexadria Engineering Journal, v. 57, p. 3351-3366, 2018.

SIDDIQUE, R. **Effect o fine aggregate replacement with class F fly ash on the mechanical properties of concrete.** Cement and concrete research, v. 33, p. 539–547, 2003.

SILVA, C. M.; LIMA, S. F. Utilização do agregado proveniente de resíduos de construção e demolição em substituição ao agregado miúdo natural do concreto. **Ciências Exatas e Tecnológicas**, Alagoas, v. 5, n. 1, p. 103-116, 2018.

SILVA, G.J.B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Belo Horizonte/MG, 2005.

SILVA, K. D. C. **Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de lâ de rocha, fibra de vidro e lâ de vidro.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Ouro Preto, 2016.

SILVA, M.G. **Avaliação da incorporação combinada dos resíduos de cascalho de perfuração de poço petrolífero e de polimento do porcelanato em cerâmica vermelha.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Natal/RN, 2012.

SILVA, N. G. **Argamassas de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Curitiba/PR, 2006.

SINGH, A.; SRIVASTAVA, V. **Ceramic waste in concrete - A Review.** Recent Advances on Engineering, Technology and Computational Sciences, 2018.

SINGH, G.; SIDDIQUE, R. **Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete.** Construction Building Materials, p. 416–422, 2012.

SOUZA, P. A. B. F. **Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo do porcelanato.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Natal/RN, 2007.

STOLBOUSHKIN, A. Y.; IVANOV, A. I.; FOMINA, O. A. **Use of coal-mining and processing wastes in production of bricks and fuel for their burning.** Internation Conference of Industrial Engineering, v. 150, p. 1496-1502, 2016.

TIBONI, R. A **Utilização da Cinza da Casca de Arroz de Termoelétrica como Componente do Aglomerante de Compósitos à Base de Cimento Portland**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas. São Carlos/SP, 2007.

TORGAL, F. P; GOMES, J. P. C; JALALI, S. **Investigations of tungsten mine waste geopolymeric binder: Strength and microstructure**. Construction Building Materials, v. 22, p. 2212–2219, 2008.

TORGAL, F. P; JALALI, S. **Reusing ceramic waste in concrete**. Construction Building Materials, v. 24, p. 832-838, 2010.

TOSUN, K.; BARADAN, B. **Effect of ettringite morphology on DEF-related expansion**. Cement & Concrete Composites, v. 32, p. 271-280, 2010.

TRINDADE, G. H. **Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem**: mitigação da reação álcali-sílica e penetração de cloretos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS, 2011.

TUTIKIAN, B. F., HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. Concreto: Ciência e Tecnologia. IBRACON, São Paulo, 2011.

VALVERDE, F. M. Agregados para construção civil. **Balanço Mineral Brasileiro**, 2011.

VAN OSS, H.G. Cement – Statistics and Information. **Mineral Commodity Summaries 2017**. U.S. Geological Survey, 2017. Disponível em <<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2017-cemen.pdf>>. Acesso: 12 jan. 2019.

VIEIRA, A. A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. João Pessoa/PB, 2005.

ZIMBILI, O.; SALIM, W.; NDAMBUKI, M. **A review on the usage of ceramic wastes in concrete production**. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, and Structural, Construction and Architectural Engineering, v. 8, 2014.