



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE
SOLO E ÁGUA



ALISSON GADELHA DE MEDEIROS

**PROPRIEDADES DE CONCRETO SUSTENTÁVEL PRODUZIDO COM PÓ DO
POLIMENTO DO PORCELANATO E RESÍDUO DA SCHEELITA**

MOSSORÓ
2019

ALISSON GADELHA DE MEDEIROS

**PROPRIEDADES DE CONCRETO SUSTENTÁVEL PRODUZIDO COM PÓ DO
POLIMENTO DO PORCELANATO E RESÍDUO DA SCHEELITA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), como requisito para obtenção do título de Doutor em Manejo de Solo e Água

Linha de Pesquisa: Impactos Ambientais pelo Uso do Solo e da Água
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Tavares Gurgel
Co-orientador: Prof. Dr. Walney Gomes da Silva

MOSSORÓ
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 tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M488p Medeiros, Alisson Gadelha de.
Propriedades de concreto sustentável produzido com pó do polimento do porcelanato e resíduo da scheelita / Alisson Gadelha de Medeiros. - 2019.
90 f. : il.

Orientador: Marcelo Tavares Gurgel.

Coorientador: Walney Gomes da Silva.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água, 2019.

1. Sustentabilidade. 2. Impactos ambientais.
3 . Beneficiamento. 4. Substituições parciais.
5. Materiais cimentícios. I. Gurgel, Marcelo Tavares, orient. II. Silva, Walney Gomes da, co-orient. III. Título.

ALISSON GADELHA DE MEDEIROS

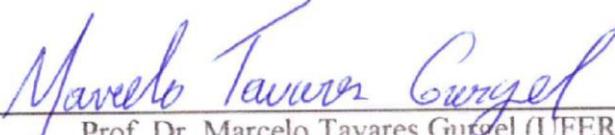
**PROPRIEDADES DE CONCRETO SUSTENTÁVEL PRODUZIDO COM PÓ DO
POLIMENTO DO PORCELANATO E RESÍDUO DA SCHEELITA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), como requisito para obtenção do título de Doutor em Manejo de Solo e Água

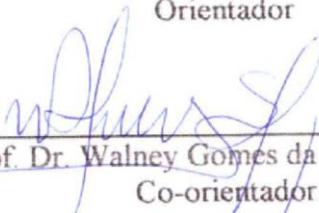
Linha de Pesquisa: Impactos Ambientais pelo Uso do Solo e da Água

Defendida em: 14 / 06 / 2019

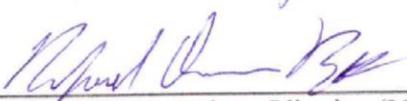
BANCA EXAMINADORA



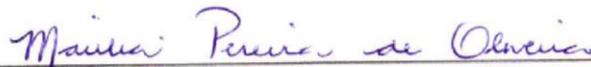
Prof. Dr. Marcelo Tavares Gurgel (UFERSA)
Orientador



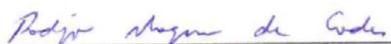
Prof. Dr. Walney Gomes da Silva (IFRN)
Co-orientador



Prof. Dr. Rafael Batista Oliveira (UFERSA)
Examinador interno ao Programa



Prof. Dra. Marília Pereira de Oliveira (UFERSA)
Examinadora externa ao Programa



Prof. Dr. Rodrigo Nogueira de Codes (UFERSA)
Examinador externo ao Programa

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus pelo dom da vida e por iluminar meus passos, me enchendo de bênçãos e forças para buscar sabedoria.

Aos meus amados e queridos pais, Francisco de Assis Medeiros Filho e Jaqueline Gadelha de Medeiros, e minha amada e querida irmã, Alana Maria Gadelha de Medeiros por sempre me apoiarem e estarem presente em todos os momentos da minha vida. Eles são a razão da minha existência.

Ao meu orientador, Marcelo Tavares Gurgel, e ao Co-Orientador, Walney Gomes da Silva, pela confiança, atenção e horas dedicadas para ajudar-me a construir esta Tese de Doutorado. Aos professores Almir Mariano e Rafael Batista pelas contribuições quanto à idealização desta pesquisa.

Aos amigos e colegas de trabalho Cláudia Yanara e Valteson Santos pelas amizades sinceras, companheirismo e as experiências vividas com conhecimentos compartilhados em laboratório, que fizeram toda diferença durante as etapas desta pesquisa.

Às instituições de ensino UFERSA, IFRN, UERN e UnP as quais foram suportes de infraestrutura para viabilizar todo procedimento experimental. E aqui destaco as colaborações científicas e suportes de laboratórios através dos professores Walney Gomes (Laboratório de Construção Civil), Marília Pereira (Laboratório de Materiais e Construção Civil), Ricardo Leite (Laboratório de processos químicos), João Maria (CSAMA), Anne Gabriella (LACAM), Solange Dombroski (LaSAN), Alexandre Rodrigues (Laboratório de Conservação de Geoplasma Animal – pelo nitrogênio líquido cedido).

Aos técnicos de laboratório Leonardo (Laboratório de processos químicos), Elídio, Jussier (Laboratório de Difração de Raios-X), Melise (CTGÁS – Laboratório de Materiais), Bruno (Laboratório de Microscopia Eletrônica) e João Neto (CSAMA – UERN).

Ao grande professor e amigo, Santos Demetrio Miranda Borjas, pelos conhecimentos compartilhados e ensinamentos de vida.

Aos meus companheiros de laboratório durante esses últimos anos: Douglas, Ingrid, Thamara, Joás, Joardson, Giovana, Cristina, Alisson Ruan, Breno e Eduardo. Obrigado por todo auxílio.

Aos meus verdadeiros amigos.

À Mina Brejuí e à Elizabeth Cerâmica pelos resíduos disponibilizados e fundamentais para investigação experimental desta Tese.

Ao Programa de Pós-Graduação de Manejo de Solo e Água pela estrutura, professores e auxílio financeiro necessário para viabilização desta pesquisa.

RESUMO

Diariamente são gerados diversos resíduos, os quais podem ser orgânicos e inorgânicos. Esses resíduos são resultantes das mais variadas atividades antrópicas e podem gerar sérios impactos ambientais. Desse modo, a geração, o mal acondicionamento e a disposição final inadequada são processos que afetam a salubridade ambiental. Diante deste contexto, a indústria da construção civil é uma das fontes em potencial de geração de resíduos, principalmente, Resíduos de Construção e Demolição (RCDs) que, entretanto, podem ser úteis através da utilização de materiais alternativos por meio do uso de resíduos como matéria-prima para produção de concretos sustentáveis e minimizar impactos. Tal premissa é pertinente, visto que o concreto é o segundo composto mais consumido do planeta, e para o atendimento de sua demanda, a produção de cimento bem como a exploração de jazidas de areia são atividades influenciadoras ao meio ambiente. Neste sentido, esta pesquisa visa às substituições parciais do cimento e da areia do concreto, por resíduos da indústria cerâmica e da mineração, respectivamente, o Resíduo do Polimento do Porcelanato (RPP) e o Resíduo da Scheelita (RS), pois o RPP pode ser importante na formação e densificação da matriz cimentícia através da formação C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado), refinamento de poros por efeito *filler* e atividade pozolânica, no sentido de melhoria da microestrutura e durabilidade do concreto. Quanto ao RS, por apresentar dióxido de silício (SiO_2) e óxido de cálcio (CaO) para o melhoramento químico do concreto, e granulometria que ao ser misturada com areia, pode proporcionar maior compacidade ao concreto. Para tornar possível as substituições, foi realizado o beneficiamento do RPP, a fim de obter granulometria compatível com o cimento e a otimização entre a substituição da areia por RS. Com isso, foi desenvolvido um planejamento experimental para a caracterização dos materiais empregados na busca de teores máximos de substituições dos resíduos, com objetivo de produzir concreto sustentável e comparar suas propriedades com concreto convencional de referência. Para tanto, foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido (propriedades físicas e mecânicas), ensaio de durabilidade quanto à penetração de íons cloreto em câmara acelerada e análises específicas de: Difratomia de Raios-X, Fluorescência de Raios-X, Microscopia Eletrônica de Varredura e Termogravimetria. Todos os ensaios foram realizados tanto nos materiais empregados, sobretudo nos resíduos, quanto nos concretos nas idades de 7, 28, 90 e 212 dias. Portanto, foi possível obter teores de substituição de 15% para o RPP e 81% para o RS na produção de concreto sustentável, e comparado ao concreto de referência, foram obtidos índices satisfatórios de trabalhabilidade, faixa similar de resistência, menores valores de absorção e porosidade total, maior resistência à penetração de íons cloreto e microestrutura densificada de C-S-H rodeado de placas hexagonais de hidróxidos de cálcio. Por fim, a viabilidade ambiental e econômica torna-se consequência, em face de que o cimento é o material mais oneroso e de maior impacto ambiental e a areia é um dos agregados mais consumidos no mundo.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Impactos ambientais. Beneficiamento. Substituições parciais. Materiais cimentícios.

ABSTRACT

Several wastes are generated daily, which can be organic and inorganic. These wastes are the result of various anthropic activities and can generate serious environmental impacts. Thus, generation, poor packaging and improper disposal are processes that affect environmental health. Given this context, the construction industry is one of the potential sources of waste generation, especially Construction and Demolition Wastes (CDWs) which, however, may be useful through the use of alternative materials through the use of waste such as waste. raw material for sustainable concrete production and minimizing impacts. This assumption is pertinent, since concrete is the second most consumed compound on the planet, and to meet its demand, cement production as well as the exploitation of sand deposits are activities that influence the environment. In this sense, this research aims at the partial substitution of cement and concrete sand by ceramic industry and mining residues, respectively, Porcelain Polishing Residue (PPR) and Tungsten Mine Waste Mud (TMWM), because PPR can be important in the formation and densification of cementitious matrix through the formation of C-S-H (Hydrated Calcium Silicate), pore refinement by filler effect and pozzolanic activity, in order to improve the microstructure and durability of concrete. As for TMWM, because it has silicon dioxide (SiO_2) and calcium oxide (CaO) for the chemical improvement of concrete, and granulometry that when mixed with sand, can provide greater compactness to concrete. To make substitutions possible, PPR processing was performed in order to obtain cement compatible particle size and the optimization between sand substitution by TMWM. Thus, an experimental design was developed for the characterization of the materials used in the search for maximum levels of waste substitution, with the aim of producing sustainable concrete and comparing their properties with conventional reference concrete. For this purpose, fresh and hardened tests (physical and mechanical properties), durability test for chloride ion penetration in accelerated chamber and specific analyzes of: X-Ray Diffractometry, X-Ray Fluorescence, Scanning Electron Microscopy and thermogravimetry. All the tests were performed in the materials used, mainly in the residues, as in the concrete in the ages of 7, 28, 90 and 212 days. Therefore, it was possible to obtain substitution levels of 15% for PPR and 81% for TMWM in sustainable concrete production, and compared to the reference concrete, satisfactory indexes of workability, similar resistance range, lower absorption values and total porosity, higher chloride ions penetration resistance and densified C-S-H microstructure surrounded by hexagonal calcium hydroxide plates. Finally, environmental and economic viability becomes a consequence, as cement is the most costly and environmentally impactful material and sand is one of the most consumed aggregates in the world.

Keywords: Sustainability. Environmental impacts. Beneficiation. Partial replacements. Cementitious materials.

LISTA DE SIGLAS

A – Agregado
ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção
ANOVA – Análise de Variância
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
C – Comparação entre médias
C₃A – Aluminato tricálcico
C₂S – Silicato dicálcico
C₃S – Silicato tricálcico
C₄AF – Ferro aluminato tetracálcico
Ca/Si – Relação Cálcio e Sílica
CaCO₃ – Calcita (Carbonato de Cálcio)
CaO – Óxido de Cálcio
CH – Portlandita (Hidróxido de Cálcio)
Cl⁻ – Íons cloreto
CO₂ – Dióxido de Cálcio
COM – Curva Ótima Média
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado
DC – Desvio para Controle
DP – Desvio Padrão amostral
DRX – Difractometria de Raio-X
Et – Etringita
FRX – Fluorescência de Raio-X
FUNASA – Fundação Nacional de Saúde
GRG – *Generalized Reduced Gradient*
IC – Intervalo de Confiança
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
Mg(OH)₂ – Brucita (Hidróxido de Cálcio)
MMQ – Método dos Mínimos Quadrados
P – Pasta
P_{COM} – Material passante acumulado nas peneiras da COM
P_M – Material passante acumulado nas peneiras das Misturas
P_{MT} – Material passante acumulado nas peneiras das Misturas teóricas
RCD – Resíduo de Construção e Demolição
REF – Referência
RPP – Resíduo do Polimento do Porcelanato
RS – Resíduo Scheelita
SiO₂ – Óxido de Silício
SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
TFD – Teor Fixo a ser Determinado
TG/DTG – Termogravimetria/Diferencial de Termogravimétiã
ZT – Zona de Transição

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
OBJETIVO GERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
ETAPAS METODOLÓGICAS.....	4
REFERÊNCIAS	5
CAPÍTULO 1.....	9
CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS E INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL PARA SUBSTITUIÇÕES PARCIAIS SIMULTÂNEAS EM CONCRETOS SUSTENTÁVEIS.....	9
1 INTRODUÇÃO	9
2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	12
2.1 Agregado miúdo	13
2.2 Agregado graúdo.....	13
2.3 Cimento.....	13
2.4 Água de amassamento	14
2.5 Resíduo do Polimento do Porcelanato	14
2.6 Resíduo da Scheelita	14
2.7 Aditivo.....	15
2.8 Proporção e composição das misturas	15
2.9 Modo de produção e cura.....	17
2.10 Ensaios no estado fresco e endurecido	18
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
3.1 Agregado graúdo.....	18
3.2 Areia e RS	19
3.3 Cimento e RPP	24
3.4 Mistura otimizada entre areia e RS – 1º Critério	28
3.5 Melhor teor de RPP – 2º Critério	32
4 CONCLUSÕES.....	37
5 REFERÊNCIAS	38
CAPITULO 2.....	44

COMPORTAMENTO FÍSICO, MECÂNICO E DE DURABILIDADE DE CONCRETOS COM MISTURAS DE RESÍDUOS DO PORCELANATO E DA SCHEELITA.....	44
1 INTRODUÇÃO	44
2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	46
2.1 Modo de produção e cura.....	47
2.2 Ensaio no estado fresco e endurecido	48
2.2.1 Propriedades físicas.....	49
2.2.2 Propriedades mecânicas	49
2.2.3 Propriedades de durabilidade	49
2.2.4 Análises mineralógica, química, microestrutural e termogravimétrica.....	51
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
3.1 Estado fresco	52
3.2 Estado endurecido.....	53
3.2.1 Propriedades físicas.....	53
3.2.2 Propriedades mecânicas	56
3.2.3 Propriedades de durabilidade	59
3.2.4 Análises mineralógica, química, microestrutural e termogravimétrica	63
4 CONCLUSÕES.....	71
5 REFERÊNCIAS	73
CONCLUSÃO GERAL	80

INTRODUÇÃO GERAL

Os impactos ambientais podem ser resultantes de qualquer atividade antrópica que venha a causar alterações de ordem física, química e biológica no meio ambiente, bem como nas influências das interações entre o meio biótico e abiótico. Neste sentido, em meio as diversas atividades desenvolvidas motivadas pelas necessidades humanas, as quais são condicionadas pela cultura e as variações de consumo dos recursos naturais e manufaturados, há constante geração de resíduos, sejam sólidos, semi-sólidos ou líquidos.

Diante dos diversos tipos de resíduos gerados, prescrições normativas e políticas públicas são fundamentais para preservação dos sistemas ambientais. Para tanto, A NBR 10004/2004 classifica os resíduos sólidos e os definem como materiais sólidos ou semi-sólidos resultantes de atividades de origem industriais, domésticas, hospitalar, comercial, agrícolas e de serviços de varrição. A Lei n.º 12.305/2010 que se refere à Política Nacional do resíduos sólidos, menciona definição com semântica similar, acrescentando os gases provenientes dessas atividades. Essa ainda classifica os resíduos sólidos em perigosos e não perigosos; sendo este último, subdivididos em inertes e não inertes.

A partir deste contexto, a geração de resíduos sólidos, seu mal acondicionamento e disposição final inadequada podem resultar em relevantes impactos ambientais que afetam a salubridade ambiental, bem como as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e de seus recursos, como por exemplo: assoreamento dos rios, contaminação dos solos e dos corpos hídricos, proliferação de vetores e transmissores de doenças, entre outros (FUNASA, 2006; FIGUEIRA, 2016).

De acordo com Matos (2010), umas das principais fontes poluidoras através das ações antrópicas é a atividade de mineração e beneficiamento de minérios, as indústrias e as atividades agropecuárias. Tais atividades no desenvolvimento de suas respectivas produções, permitem a geração de diversos resíduos: metais, vidros, lodos, matéria orgânica, plástico, resíduo eletrônico (VESILIND e MORGAN, 2013).

Nesta perspectiva, a indústria da construção civil, que desempenha relevante papel no desenvolvimento mundial por meio de grandes obras de infraestrutura, tem o concreto como composto de utilização difundida em diversos países. No entanto, sua utilização em larga escala por obras civis (edificações, pontes, viadutos), tem demandado grandes quantidades de recursos naturais para sua produção através de seus componentes convencionais (areia, brita e cimento) e na geração de quantidades consideráveis de resíduos sólidos, por RCDs (MACIEL, 2009; AGOPYAN e JOHN, 2011; ASDRUBALI, D'ALESSANDRO e SCHIAVONI, 2015; LOCKREY et al., 2018). Os RCDs são regulamentados pela Resolução CONAMA 307/2002,

que estabelece critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção de civil, de modo a reduzir os impactos ambientais oriundos desta atividade.

Em meio a essa problemática, nos últimos anos, têm sido desenvolvidas pesquisas com o objetivo de se utilizar materiais alternativos e novas tecnologias de concretos, que viabilizem sua produção e satisfaçam propriedades específicas de projetos segundo as normas vigentes. Por exemplo, conforme regulamenta no Brasil, a NBR 6118/2014, bem como aliada à sustentabilidade.

Para tanto, podem ser citados materiais em pesquisas e na literatura: argila expandida, lodos de indústrias, resíduo de corte de granito, resíduos cerâmicos, cinza do bagaço da cana-de-açúcar, fibras vegetais e cinza da casca de arroz (GONÇALVES, 2000; MENEZES, NEVES e FERREIRA, 2002; FONTES et al., 2004; BEZERRA et al., 2011; BORJA, 2011; SAMPAIO, 2013; RODRIGUES, BRITO e SARDINHA, 2015; SILVA, 2015). Além da busca de concretos com propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, trabalhos que incorporam resíduos em substituições ou adições à mistura, também visam analisar e garantir parâmetros de durabilidade (porosidade, permeabilidade, resistência à difusão de gases e íons, alcalinidade). Desta forma, os concretos produzidos, são submetidos em ambientes e/ou situações de elevada agressividade, seja em grandes centros urbanos pela difusão de dióxido de carbono (CO_2) ou pela penetração de sais em áreas marinhas por íons cloreto (Cl^-) (ANN et al., 2010; RIBEIRO, 2010; MEIRA et al., 2014).

Em virtude desta temática, a busca de resíduos disponíveis de acordo com suas regiões de origem, podem proporcionar como materiais alternativos para produção de concretos sustentáveis, que possam vir a garantir aplicabilidade na construção civil, durabilidade ao longo do tempo e racionalidade dos recursos naturais. Com isso, estudos sobre a origem e geração desses resíduos, disposição final e disponibilidade são informações relevantes para investigação dos impactos ambientais causados por eles e pelas atividades que lhes geram. Outrossim, quanto a sua aplicação na produção de concretos, é necessário que se desenvolva a caracterização físico-química desses resíduos e que verifiquem suas influências nas propriedades no estado fresco e endurecido, devido a heterogeneidade do concreto.

Para a durabilidade, são necessários estudos de características físicas (massa específica, porosidade, absorção e permeabilidade), bem como a qualidade quanto a química do concreto, simulados em ambientes nocivos a esses materiais ou por meio de ensaios acelerados de difusão de dióxido de carbono (CO_2) e/ou de íons cloreto (Cl^-), por exemplo.

Com o objetivo de substituir resíduos na produção de concretos em seus materiais convencionais, a fim de se obter propriedades físicas e mecânicas adequadas, parâmetros de durabilidade consideráveis e buscar a sustentabilidade, há o interesse de se realizar o

reaproveitamento desses recursos e estudar suas implicações, de acordo com sua disponibilidade a depender da região. No Nordeste brasileiro, em específico, na região Semiárida, existem indústrias de materiais cerâmicos e de mineração, as quais possuem grande relevância produtiva e econômica. Desta forma, essas atividades industriais são determinantes para a geração de resíduos característicos e em quantidades consideráveis.

Em evidência, a fabricação de peças de porcelanato produz uma quantidade considerável de resíduo, proveniente do processo de seu polimento. A indústria Elizabeth situada em João Pessoa por exemplo, gera cerca de 32 milhões de toneladas de resíduos diariamente. No Brasil, considerando as demais indústrias desse setor, infere-se que centenas de milhares de toneladas desses resíduos são estocados todos os dias (SILVA, 2012).

Com relação à indústria de mineração, a mina do Brejuí, desde 1940 explora na região do Seridó potiguar o minério da scheelita, do qual pode-se extrair o tungstênio e no processo de seu beneficiamento, há elevada geração de resíduos, acumulados em aproximadamente 4,5 milhões de toneladas do resíduo do tipo grosso e 2,5 milhões do tipo fino (GERARB, 2014). Diariamente, esse processo nessa mina resulta cerca de 50 m³ de resíduos, e todo esse montante é depositado em pilhas sobre o solo (PAIVA, 2013).

A sustentabilidade na produção de concretos com substituições de areia e cimento são pertinentes. Pois há exploração por dragagem ou desmonte hidráulico de milhares de metros cúbicos de jazidas de areia e que o Brasil possui grande produção de cimento. Entre os anos de 2005 e 2012, o aumento de consumo de concreto foi de 180%, enquanto o de cimento foi superior a 80%, estima-se que foram produzidos 51 milhões de m³ de concreto em 2012 (ABCP, 2013). Em 2017, foram produzidas 54.003.893 toneladas de cimento, sendo a região Nordeste a segunda mais produtiva com 11.491.440 toneladas, inferior apenas à região Sudeste (SNIC, 2017).

Da mesma forma ocorre para os agregados, índices estimados pela (ANEPAC e IBGE, 2014) em 2014 indicaram que o Nordeste é o segundo maior consumidor com 154,3 milhões de toneladas. No Brasil, a projeção do mesmo ano é de 741 milhões de toneladas, sendo 302 milhões para produção de brita e 439 milhões para areia; somando um investimento de R\$ 700 milhões de reais, correspondente a um valor de produção de R\$ 19 bilhões de reais (valor bruto posto consumidor).

Quanto a produção de cimento, é uma das principais emissoras industriais de dióxido de carbono (CO₂), importante gás de efeito estufa (OSS, 2017), sendo responsável por 7% da geração mundial (APRIANTI et al., 2015). Portanto, a otimização racional do cimento é relevante na redução dos impactos ambientais oriundos de sua produção, e concretos com

substituições e adições no cimento permitem a redução de emissão de CO₂ por tonelada de cimento produzido (STARK, 2011).

OBJETIVO GERAL

Produzir concretos sustentáveis a partir do reaproveitamento de resíduos disponíveis na região Semiárida, utilizando Resíduo do Pó do Porcelanato (RPP) e o Resíduo da Scheelita (RS) em substituição parcial simultânea, respectivamente, do cimento e da areia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar os materiais da mistura e beneficiar o RPP para compreensão dos efeitos nas propriedades dos concretos produzidos.
- Otimizar as substituições parciais do RS e do RPP em relação aos materiais convencionais de mistura.
- Analisar as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade do concreto sustentável produzido em comparação à mistura convencional de referência.
- Avaliar a microestrutura dos concretos produzidos para análise combinada dos efeitos das substituições por auxílio de ensaios de DRX, FRX, MEV/EDS e TG/DTG.
- Minimizar impactos ambientais e viabilizar uma alternativa de técnica e econômica através da produção de concretos sustentáveis.

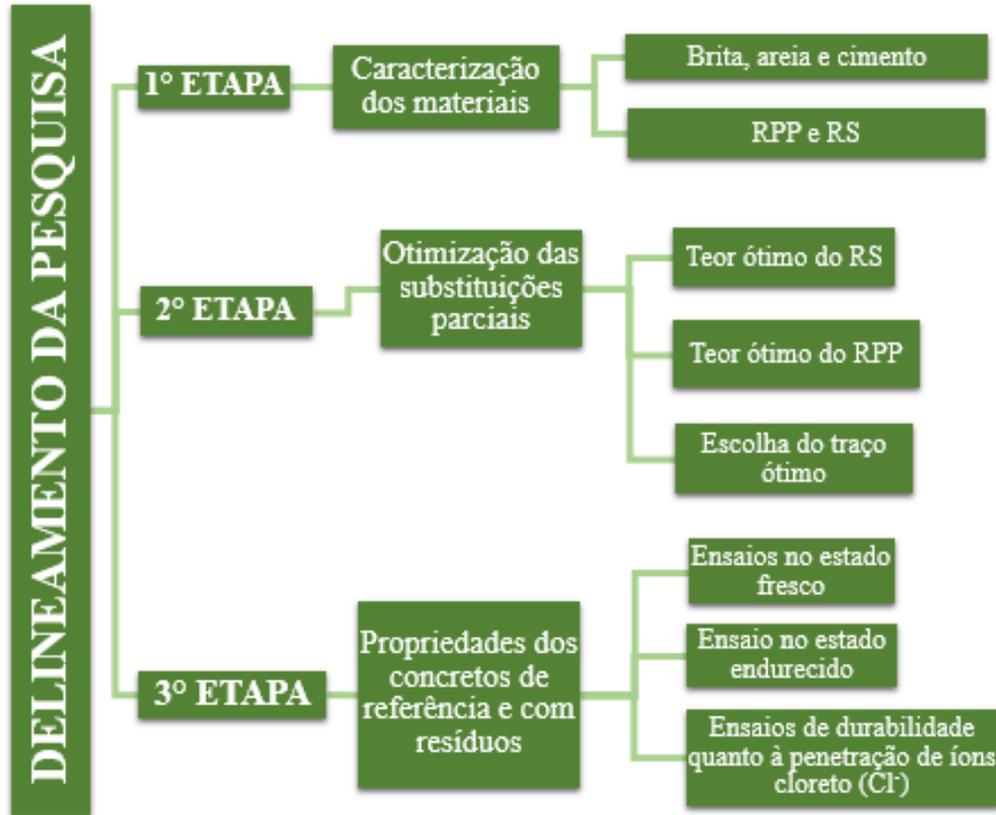
ETAPAS METODOLÓGICAS

Para a realização desta pesquisa foram necessárias três etapas, as quais estão ilustradas no Fluxograma do delineamento metodológico. Esta pesquisa é composta por dois capítulos, sendo as etapas 1 e 2 constituindo o primeiro capítulo, e a terceira etapa referente ao segundo capítulo.

Na primeira etapa, foram realizadas as caracterizações dos materiais convencionais da mistura, bem como do RPP por beneficiamento e do RS.

Na segunda etapa, foi realizada a busca do teores ótimos para o RS e RPP na produção do concreto sustentável, respectivamente, por compatibilização granulométrica do RS com a areia, a partir dos valores médios ótimos estabelecidos pela NBR 7211/2009, e de propriedades físicas e mecânica resultantes de composições de traços com teores de RPP de 5-30% aos 28 dias.

Fluxograma do delineamento metodológico.



Fonte: Autor (2019).

Na terceira etapa, a partir da produção do concreto sustentável com teores otimizados de RPP e RS em substituição parcial do cimento e da areia, foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido em comparação ao concreto convencional de referência. Para tanto, foram analisadas propriedades físicas e mecânicas, bem como de durabilidade por penetração de íons cloreto em câmara acelerada durante 90 dias.

Por fim, também foi realizada nesta etapa análises em DRX, FRX e MEV/EDS dos concretos produzidos nas idades de 7, 28 e 90 dias, bem como TG/DTG aos 212 dias, a fim de se obter a compreensão da combinação dos efeitos das substituições efetuadas em relação ao concreto de referência.

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) **NBR 10004 (2004a) – Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 71p.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) **NBR 6118 (2014c) – Projeto de estruturas de concreto – procedimento**. Rio de Janeiro.

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

ANN, Y. K.; SONG, H. W. *Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete*. **Corrosion Science**, v. 49, p. 4113-4133, 2007.

APRIANTI, E. et al. *Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review*. **Construction and Building Materials**, v.74, p. 176-187, 2015.

ASDRUBALI, F.; D’ALESSANDRO, F.; SCHIAVONI, S. *A review of unconventional sustainable building insulation materials*. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 4, p. 1-17, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Disponível em: https://www.abcp.org.br/cms/imprensa/noticias/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela_cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto/. Acessado em: 13 de maio 2019.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO (ANEPAC). Disponível em: <http://anepac.org.br/agregados/mercado>. Acessado em: 13 de maio 2019.

BEZERRA et al. *Aplicação da cinza da casca de arroz em argamassas de assentamento*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 15, n.º 6, p. 639-645, 2014.

BORJA, E. V. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011, 230p.

BRASIL (2002). **CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n.º 307, de 05 de julho de 2002**. Ministério da Cidades, Secretaria Nacional da Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/2002.

BRASIL (2006). **FUNASA, Brasil. Fundação Nacional de Saúde. Orientações Técnicas para apresentação de Projetos de Resíduos Sólidos Urbanos**. Brasília. Fundação Nacional de Saúde, 46 p.

FIGUEIRA, A. C. B. (Org.) **Gerenciamento de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: Seses, 2016. 160p.

FONTES, C. M. A. et al. *Potentiality of sewage sludge ash as mineral additive in cement mortar and high performance concrete*. **Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures**, 2004.

GERARB, A. T. F S. C. **Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Civil. Natal/RN, 2014.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

Lei Federal Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 13 de maio de 2019.

LOCKREY, S. et al. *Concrete recycling life cycle flows and performance from construction and demolition waste in Hanoi*. **Journal of Cleaner Production**, v. 179, p. 593-694, 2018.

MACIEL, J. C. S. *Viabilidade Técnica da Utilização de Concretos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição*. **Revista Igapó, Manaus**, v. 3, p. 109-114, 2009.

MATOS, A. T. **Poluição ambiental impactos no meio físico**. Editora UFV, Viçosa, 2010. 260p.

MEIRA, G. R. et al. *Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmospheres zone*. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 289-298, 2014.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. *O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, vol. 6, n. 2, p. 303-313, 2002.

OSS, H. G. **Cement [Advance release]**. U. S. Geological Survey Minerals Yearbook, 33p, 2017

PAIVA, E. H. G. **Avaliação do concreto de cimento Portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013, 105p.

RIBEIRO, D. V. **Influência da adição da lama vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010, 222p.

RODRIGUES, R; BRITO, J; SARDINHA, M. *Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge*. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 349-356, 2015.

SAMPAIO, Z. L. M. **Análise do comportamento mecânico de concretos produzidos com incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar de variedades**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013, 134p.

SILVA, J. D. J. **Avaliação da potencialidade de incorporação de lodo de uma indústria de produtos de limpeza como adição mineral em concretos de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2015, 106p.

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 (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 2012.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1537281236.pdf>. Acessado em: 13 de maio 2019.

STARK, J. *Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis*. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 666-678, 2011.

VESILIND, P. A.; MORGAN, S. M. **Introdução à engenharia ambiental |Introduction to environmental engineering**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

CAPÍTULO 1

CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS E INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL PARA SUBSTITUIÇÕES PARCIAIS SIMULTÂNEAS EM CONCRETOS SUSTENTÁVEIS

RESUMO

A indústria da construção civil utiliza em grande escala recursos naturais para produção de concreto, dentre os quais cimento e agregados são componentes fundamentais. Esse processo causa diversos impactos ambientais que vão em sentido contrário às proposições e perspectivas da sustentabilidade. De modo igual, indústrias cerâmica e de mineração, na fabricação e beneficiamento de seus produtos, geram diversos resíduos os quais, muitas vezes, são acondicionados de forma inadequada e/ou irregular, podendo ser danosos ao meio ambiente na potencialidade de contaminação do ar, de corpos d'água e do solo. Neste sentido, esta pesquisa investiga a produção de concretos sustentáveis com substituições parciais simultâneas do cimento e da areia, respectivamente, por Resíduo do Polimento do Porcelanato (RPP) e Resíduo da Scheelita (RS). Para tanto, foram realizados ensaios físicos, mineralógicos, químicos e microestruturais dos materiais. A termogravimetria e pozolanicidade dos resíduos também foram analisadas. Na escolha dos teores a serem aplicados à mistura dos concretos, foram utilizados dois critérios, o primeiro foi na fixação da quantidade de RS, através de uma simulação teórica no SOLVER do MS EXCEL com o uso da minimização do erro pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), com objetivo de obter uma distribuição granulométrica mais ajustada dos valores médios da zona ótima, segundo a NBR 7211/2009. O segundo consistiu na produção de oito traços com o teor fixo de RS encontrado e variando a quantidade de RPP de 0 a 30%, para escolha do teor mais viável por Análise de Variância (ANOVA) de um fator sobre as propriedades de absorção, porosidade e resistência à compressão aos 28 dias. No estado fresco, foi realizado ensaio de *slump test*. Os resultados demonstram bons índices de pozolanicidade apenas para o RPP, melhor curva de ajuste com 81% de RS em substituição, diminuição da trabalhabilidade, da resistência à compressão, da absorção, da porosidade e aumento da massa específica dos concretos contendo resíduos em relação ao concreto convencional. Com relação a ANOVA, o teor de RPP mais viável foi de 15%.

Palavras-chave: Pozolanicidade. Ajuste granulométrico. Absorção total. Porosidade total. Resistência à compressão.

1 INTRODUÇÃO

Em meio as diversas atividades desenvolvidas motivadas pelas necessidades humanas, que condicionadas pela cultura e às variações de consumo dos recursos naturais e manufaturados, há constante geração de resíduos, sejam sólidos ou líquidos. Essa geração provoca impactos ambientais, que causam alterações de ordem física, química e biológica nos sistemas ambientais: ar, água e solo.

Diante desse contexto, a indústria da construção civil, possui cadeia produtiva em grande escala que impulsiona parte do desenvolvimento social e econômico, com o emprego de estruturas de concreto difundidas mundialmente, tornando-o segundo mais consumido do planeta, perdendo apenas para água (MEHTA e MONTEIRO, 2008). De forma geral, também é uma das indústrias em potencial que mais se produz resíduos no meio ambiente (MAGALHÃES, DANILEVICZ e SAURIN, 2017), associado ao aumento na demanda por concreto, que causa o esgotamento dos recursos naturais (PANDA et al., 2017).

Com isso, para se buscar a sustentabilidade, o uso de materiais alternativos na produção de concretos torna-se pertinente, desde que se tenha viabilidade técnica quanto as propriedades no estado fresco e endurecido. Pesquisas com RCDs (YUAN, 2013; LAI et al., 2016; ESA, HALOG e RIGAMONTI, 2017; MARTOS et al., 2018) são exemplos da sustentabilidade vinculada aos resíduos gerados, ao uso como novos materiais para aplicação, ao estudo de novas tecnologias de produção de concreto, à da vida útil das construções e à economia.

Em virtude desta temática, resíduos disponíveis de acordo com a região de origem, podem proporcionar incorporações em argamassas e concretos que possam vir a garantir aplicabilidade na construção civil e sustentabilidade dos recursos. Para tanto, podem ser citados resíduos em pesquisas recentes: de corte de mármore, da cinza da casca de arroz, de ripas de bambu, de lodo de esgoto e da cerâmica (MENEZES, NEVES e FERREIRA, 2002; FONTES et al., 2004; BRAGA FILHO et al., 2010; BEZERRA et al., 2011; RODRIGUES, BRITO e SARDINHA, 2015).

Nesta perspectiva, oriundo da indústria cerâmica, devido ao acabamento fino numa produção em grande escala de pisos de porcelanato e, na possibilidade de apresentar propriedades como adição de *filler* (SOUSA JÚNIOR, 2016), o Resíduo do Polimento do Porcelanato (RPP) torna-se interessante para investigações científicas em materiais cimentícios.

O RPP possui características específicas que podem melhorar a resistência de materiais cimentícios, por exemplo, pastas de cimento e dos concretos produzidos com sua incorporação. Além disso, o procedimento que resulta em sua obtenção agrega valor aos ladrilhos cerâmicos, devido ao alto brilho obtido na redução da rugosidade da superfície (ALVES et al., 2011).

De'Gennaro et al. (2009) e Medina, Rojas e Frías (2012) respectivamente, demonstram acréscimos nos valores de resistência à compressão no uso de RPP como agregados leves, e melhorias na sua microestrutura, favorecendo a diminuição de parâmetros físicos de porosidade e de absorção. Porém, notável diminuição na plasticidade foi lograda em

(SOUZA, 2007). Jacoby e Pelisser (2015) realizaram estudo através das substituições de 5, 10 e 20% de RPP no cimento em pastas de argamassas, e verificou-se aumento de 18% da resistência à compressão aos 84 dias; finura, composição química e potencial pozolânico foram fatores influenciadores para melhoria deste resultado.

Matos et al. (2018a) verificaram que a substituição de até 20% desse resíduo pelo cimento, melhorou as propriedades reológicas do concreto auto adensável. Ressalta-se que o Brasil gera cerca de 60 mil toneladas de RPP por ano. Recentemente, Matos et al. (2018b) obtiveram de 95 a 98% do valor resistência à compressão do concreto de referência e atividade pozolânica comprovada por análise termogravimétrica.

O RPP possui composição mineralógica rica em quartzo e mullita na massa porcelânica (SOUZA, 2007) e o principal componente químico é o (SiO_2) dióxido de silício, com percentagens acima de 60%, fator que colabora na sua aplicabilidade em materiais cimentícios como substituição parcial aglomerante. Fato que contribui para o melhoramento químico, atuando como material pozolânico e na formação de C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado), um dos principais responsáveis pela resistência do concreto e, conseqüentemente, da melhoria de sua durabilidade, bem como na diminuição de possíveis impactos ambientais, com disposição final na estabilização do resíduo (SOUZA, 2014).

Baghel et al. (2015) estudaram a reutilização de resíduos provenientes da mineração e de indústrias, pois existe grande geração desses materiais e riscos de problemas ambientais relevantes, devido à sua disposição em aterros, como, por exemplo, na contaminação de rios. Na Coreia do Sul, estudos foram realizados por causa da disponibilidade desses resíduos, aproximadamente 12 milhões de toneladas armazenadas durante 40 anos de atividade de mineração (JUNG e CHOI, 1998).

No Canadá, resíduos de mineração de ouro foram utilizados para produção de concretos e apresentaram bons índices de desempenho mecânico (BENARCHID et al., 2018). O Resíduo da Scheelita (RS) obtido de minas de tungstênio, é um recurso bastante disponível e sua disposição final pode ser incorporada como substituição parcial do agregado miúdo (PAIVA, 2013) na produção de concretos, pois os principais componentes químicos são (SiO_2) dióxido de silício e (CaO) óxido de cálcio (SOUZA, 2012), que contribuem para o melhoramento químico.

Choi et al. (2009) incorporaram resíduo de mina de tungstênio para produção de argamassas, e foi constatado eficácia na estabilização e solidificação de metais pesados, porém, o aumento do teor do resíduo diminuiu a trabalhabilidade e a resistência à compressão.

Pyo et al. (2018) utilizaram resíduo de minas de tungstênio à base de quartzo para produção e avaliação de concretos de alto desempenho em substituição parcial da areia

(agregado miúdo), desta forma, verificaram que suas propriedades variaram de acordo com o tamanho e a forma das partículas dos resíduos na trabalhabilidade, na resistência e na porosidade, obtendo-se melhores resultados com agregados de maiores dimensões.

Evdokimov, Maslakov e Evdokimov (2016) estudaram a produção de materiais de construção utilizando resíduo de mina de tungstênio e verificaram que o emprego de 20 a 30% em substituição da quantidade de cimento, não houve diminuição da resistência à compressão do concreto.

Pode-se também destacar, o emprego de aglutinante geopolimérico a partir do lodo residual de exploração tungstênio como novo material cimentício, através de resíduos de minas desidroxilados em misturas com pequenos teores de hidróxido de cálcio, ativados com soluções de hidróxido de sódio e resíduo de vidro (TORGAL, GOMES e JALALI, 2005a). Em pesquisas posteriores, (TORGAL, GOMES e JALALI, 2006b; TORGAL, GOMES e JALALI, 2007c; TORGAL, GOMES e JALALI, 2007d) obtiveram resultados de que essa aplicação resultou na alta resistência nas idades iniciais, baixa absorção de água e boa aderência ao concreto.

Diante do exposto, este capítulo objetiva realizar um estudo experimental para substituição simultânea parcial de teores de RPP e RS, respectivamente, em relação ao cimento e areia, na produção de concretos sustentáveis, com obtenção das caracterizações desses materiais e análises das variações das propriedades físicas e mecânica desses concretos.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia desta pesquisa foi desenvolvida na caracterização dos materiais utilizados e na produção de concretos sustentáveis, com ênfase nas substituições parciais da areia e do cimento, respectivamente, pelo RS e RPP. Para isso, foram realizados ensaios de laboratório visando a caracterização físico-química, mineralógica e microestrutural desses materiais. Com relação ao concreto, os ensaios realizados foram de absorção, porosidade e resistência à compressão.

A análise granulométrica a laser e as identificações da composição química, mineralógica, termogravimétrica e microestrutural foram utilizados os equipamentos: CILAS *Particle Size* – 920, EDX-7000, XRD-6000 e TGA-50 ambos da SHIMADZU, TESCAN VEGA 3 LMU. As análises em FRX foram realizadas a vácuo e de DRX a partir de varreduras com goniômetro de ângulo 2θ , à razão de 2° por minuto com intervalo de medida na faixa de 10 a 80°.

2.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para produção dos concretos foi areia quartzosa de origem natural, obtida em loja de materiais de construção na cidade de Mossoró/RN e proveniente de jazidas da região. Ensaio de caracterização foram realizados conforme preconiza as regulamentações normativas vigentes da Associação Brasileira de Norma Técnicas (ABNT), com o objetivo de obter seus parâmetros físicos e classificação do agregado, de acordo com a dimensão de suas partículas. Com isso, foram realizados ensaios de análise granulométrica (NBR NM 248/2003), massa específica real (NBR NM 52/2009) e massa específica unitária (NBR NM 45/2006). Ademais, análises mineralógica, química e microestrutural foram obtidas através de ensaios respectivamente de, Difractometria de Raios X (DRX), Florescência de Raios X (FRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

2.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo foi proveniente de jazidas da região, adquirido em loja de materiais de construção da cidade de Mossoró/RN. Este agregado é do tipo brita granítica e sua caracterização foi obtida através dos seguintes ensaios, regulamentados pelas prescrições da ABNT: análise granulométrica (NBR NM 248/2003), massa específica real (NBR NM 53/2009) e massa específica unitária (NBR NM 45/2006).

2.3 Cimento

O cimento aplicado nesta pesquisa foi do tipo Portland CP V ARI RS de Alta Resistência Inicial e Resistente a Sulfatos regulamentado por (NBR 16697/2018). Para sua caracterização, foram utilizadas as regulamentações da ABNT e, com isso, desenvolvidos os ensaios a fim obter sua caracterização e propriedades. Os ensaios realizados foram de granulometria a laser, índice de finura (NBR 11579/2012), determinação da finura de permeabilidade ao ar pelo método Blaine (NBR 16372/2015), tempo de pega (NBR 16606/2017; NBR 16607/2017), expansibilidade Le Chatelier (NBR 11582/2016), resistência à compressão aos 1, 3 e 7 dias (NBR 7215/1997) e massa específica real (NBR 16605/2017). Análises mineralógica, química e microestrutural foram obtidas através de ensaios respectivamente de, Difractometria de Raios X (DRX), Florescência de Raios X (FRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

2.4 Água de amassamento

Água potável oriunda de poço profundo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) do campus Mossoró com as seguintes características físico-químicas aferidas em laboratório: pH e condutividade elétrica de igual a 8,51 e 71 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 26,4 °C com conteúdo de 146 mg de cloreto/l, em conformidade com a NBR 15900/2009 a qual prescreve limites de cloreto na água de amassamento para concretos.

2.5 Resíduo do Polimento do Porcelanato

O RPP foi obtido da cerâmica Elizabeth localizada no estado da Paraíba. Este resíduo possuía estrutura de lodo, desta forma, foi beneficiado através de processos de secagem em estufa à 70 °C durante 24 horas (SOUSA JÚNIOR, 2016), maceramento, moagem em moinho de bolas por 40 minutos, peneiramento na peneira de abertura #200 (0,075 mm) e escolhido o material passante – para se obter dimensão e finura compatíveis com o seu material de substituição, o cimento. Quanto a sua caracterização, foram realizados ensaios de granulometria a laser, massa específica real (NBR 16605/2017), massa específica unitária (NBR NM 45/2006), determinação da finura de permeabilidade ao ar pelo método Blaine (NBR 16372/2015) e índice de atividade pozolânica (NBR 12653/2014; NBR 5752/2014; NBR 15895/2010), todos preconizados pela ABNT. Além disso, foram obtidas suas características mineralógicas, químicas e microestrutural através de Difractometria de Raios X (DRX), Florescência de Raios X (FRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A atividade pozolânica foi aferida também mediante o método da condutividade elétrica segundo o método proposto por (LUXÁN, MADRUGA e SAAVEDRA, 1989) durante 120, 1200 e 7200 segundos. Análise de TG/DTG foi realizada em amostra seca em 50 °C por 10 minutos, para que não houvessem variações de umidade, a temperatura alcançou 850 °C numa taxa de aquecimento de 10 °C/min e 100 ml/min de fluxo de N₂ usando cadinho de platina.

2.6 Resíduo da Scheelita

O RS foi obtido de uma empresa de mineração (Mina do Brejuí) de exploração de tungstênio localizado na região do Seridó do estado do Rio Grande do Norte. Esse material foi caracterizado de acordo com a prescrições da ABNT e as análises mineralógica, química e microestrutural foram através de Difractometria de Raios X (DRX), Florescência de Raios X (FRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os ensaios físicos foram de análise

granulométrica (NBR NM 248/2006), massa específica real (NBR NM 52/2009), massa específica unitária (NBR NM 45/2006) e atividade pozolânica (NBR 12653/2014; NBR 5752/2014; NBR 15895/2010), bem pelo método da condutividade elétrica por (LUXÁN, MADRUGA e SAAVEDRA, 1989) durante 120, 1200 e 7200 segundos. A pozolanidade foi aferida devido às possíveis interações dos materiais na heterogeneidade do concreto produzido e formação dos produtos de hidratação do cimento. Análise de TG/DTG também foi realizada, com amostra seca em 50 °C por 10 minutos, para que não houvessem variações de umidade, a temperatura alcançou 850 °C numa taxa de aquecimento de 10 °C/min e 100 ml/min de fluxo de N₂ usando cadinho de platina.

2.7 Aditivo

Foi utilizado na mistura do concreto aditivo do tipo superplastificante sintético baseado na nova tecnologia de polímeros policarboxilados, com mecanismo de funcionamento para tornar possível a produção de concretos com baixos conteúdos de água e obter propriedades desejadas no estado fresco em dosagens econômicas. O aditivo possui as seguintes características: líquido, cor marrom, 1,08 g/cm³ de densidade e margem de dosagem recomendada entre 0,2 a 5% em relação à massa do cimento.

2.8 Proporção e composição das misturas

Foi fixado um traço base de Referência (REF) de consumo acima de 400 kg/m³, com proporções em massa de 1:1,65:2,20 (cimento, areia e brita) e relação água/cimento de 0,4, com utilização de 0,5% aditivo superplastificante.

Para a produção dos concretos sustentáveis com as substituições parciais do RPP e RS e avaliação das suas propriedades no estado fresco e endurecido, foram produzidos oito traços a partir do convencional, ou seja, do REF.

Desta forma, na busca de obter concretos com propriedades reológicas similares à mistura convencional, utilizou-se dois critérios para a escolha dos teores dos resíduos nas substituições propostas entre os materiais.

No primeiro critério, houve a busca de um Teor Fixo a ser Determinado (TFD) de RS, através da compatibilização granulométrica desse resíduo em substituição parcial da areia, levando em consideração a distribuição dos tamanhos das partículas do ensaio de granulometria de cada um deles.

Este procedimento teve o objetivo de obter uma curva de distribuição granulométrica mais ajustada possível daquela estabelecida como “zona ótima”, em conformidade com a NBR 7211/2009 (Tabela 1). Com isso, a curva ótima teórica foi construída a partir dos valores médios dos limites superiores e inferiores do material retido acumulado na série de peneiras, conforme a norma supracitada e denominada como Curva Ótima Média (COM).

Tabela 1: Limites dimensionais para o agregado miúdo para utilização em concreto.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310 -1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Fonte: Adaptada da NBR 7211 (2009).

Para tanto, a partir da obtenção das curvas granulométricas da areia e do RS, foi utilizado o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) e o módulo SOLVER do MS EXCEL, com o objetivo de encontrar o valor de TFD variando de 0 a 100%, de modo que a soma dos quadrados dos erros da série de peneiras do material retido entre as curvas teóricas da mistura (areia+RS) e a COM fosse minimizado. O método utilizado no SOLVER foi o *Generalized Reduced Gradient (GRG)*, destinado a resolver problemas suaves e não lineares das variáveis de decisão, com variáveis irrestritas não negativas. O MMQ foi utilizado para determinar a soma dos quadrados dos erros entre as curvas.

Diante disto, nessas análises, foram utilizadas as frações de areia retidas nas peneiras de aberturas 1,18 e 2,36 mm e passante na peneira de abertura 4,8 mm, misturadas com o TFD, a fim de simular o melhor ajuste teórico mediante o procedimento mencionado e comparar com a granulometria experimental.

Após este procedimento, foram calculadas massas unitárias com misturas de diferentes porcentagens de RS com a areia, com o objetivo de verificar o empacotamento.

O segundo critério foi em relação ao RPP, desta forma, seu teor foi variado em incrementos de 5% até 30% em substituição do cimento nos traços de concretos. Alnahhal et al. (2018) verificou efeito positivo a partir de substituições no cimento em concretos, com teores de até 30% por materiais pozolânicos. Diante desses procedimentos, foram produzidos o traço convencional, ou seja, o REF com 0% de resíduos, o traço de controle com o TFD da

análise da mistura prévia da areia e o RS com 0% de RPP, bem como os demais traços com variações dos teores de RPP. Os traços produzidos estão discriminados na Tabela 2.

Tabela 2: Composições dos traços produzidos.

Traço ⁽¹⁾	Traço em massa dos materiais constituintes						
	Cimento	Areia	Brita	Água	Aditivo (%)	RPP	RS ⁽²⁾
REF	1,00	1,65	2,2	0,4	0,5	0,00	0,00
T(%RS)/0	1,00	1,65-TFD	2,2	0,4	0,5	0,00	TFD
T(%RS)/5	0,95	1,65-TFD	2,2	0,4	0,5	0,05	TFD
T(%RS)/10	0,90	1,65-TFD	2,2	0,4	0,5	0,10	TFD
T(%RS)/15	0,85	1,65-TFD	2,2	0,4	0,5	0,15	TFD
T(%RS)/20	0,80	1,65-TFD	2,2	0,4	0,5	0,20	TFD
T(%RS)/25	0,75	1,65-TFD	2,2	0,4	0,5	0,25	TFD
T(%RS)/30	0,70	1,65-TFD	2,2	0,4	0,5	0,30	TFD

⁽¹⁾ Os traços das misturas indicam: T – Traço; (%RS)/(%RPP) – Porcentagem do RS seguida da porcentagem do RPP. ⁽²⁾ Teor Fixo a ser determinado (TFD).

Fonte: Autor (2019).

A escolha do melhor teor de RPP a ser substituído no cimento foi sustentada através da avaliação das propriedades nos estado fresco e endurecido aos 28 dias dos concretos produzidos. Para tanto, utilizou-se ANOVA de um fato por teste de Duncan com 95% de confiança sobre as propriedades obtidas de: absorção, porosidade e resistência à compressão.

2.9 Modo de produção e cura

Com relação ao preparo, foi utilizado o método convencional em betoneira mecânica de 120 litros com a seguinte sequência de mistura: brita, metade da água de amassamento, metade do cimento, areia e metade do cimento. Vale ressaltar que a outra metade da água de amassamento foi utilizada gradativamente ao longo da mistura, a partir da aplicação da primeira metade do cimento, junto à diluição do aditivo superplastificante.

Para os traços em que houve substituição parcial dos resíduos, esses foram misturados previamente, ou seja, o RPP com o cimento e o RS com a areia em um recipiente metálico com volume compatível e com auxílio de colher de pedreiro. O método de cura aplicado foi o de submersão em tanque com água adicionada de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 .

Os corpos de prova moldados (NBR 5738/2016) ficaram em repouso por 24 horas e, após este período, foram desmoldados e submetidos ao processo de cura citado até a data de realização dos ensaios do concreto do estado endurecido. Para este estudo foram produzidos 8 corpos de prova de dimensões 10x20 cm para cada traço, 4 para os ensaios de absorção e porosidade por imersão e 4 para ensaio de resistência à compressão, totalizando 64 corpos de prova.

2.10 Ensaios no estado fresco e endurecido

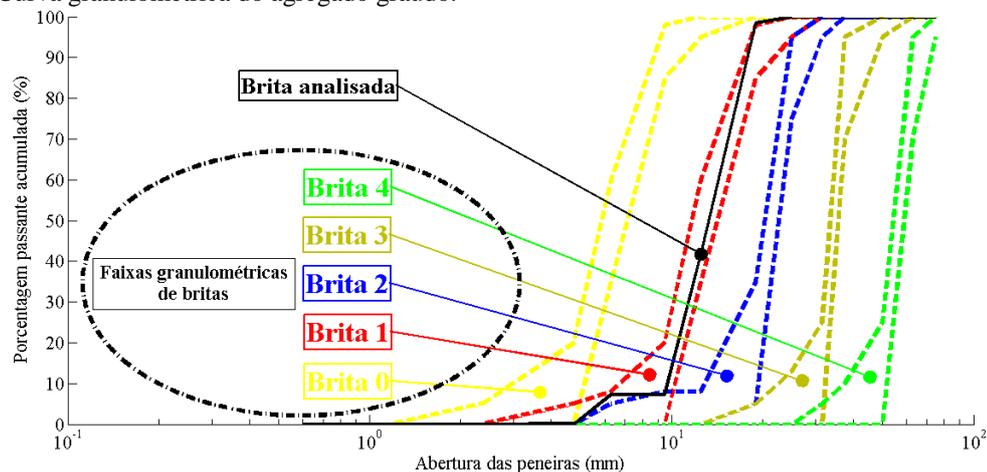
Os concretos sustentáveis produzidos foram submetidos aos ensaios de consistência *Slump test* (NBR NM 67/1998) no estado fresco. No estado endurecido, a fim de verificar suas propriedades físicas e mecânica, os concretos foram retirados da cura aos 28 dias e submetidos aos ensaios de absorção e porosidade total por imersão (NBR 9778/2009) e resistência à compressão (NBR 5739/2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Agregado graúdo

A Figura 1 ilustra a curva granulométrica do material analisado utilizado como agregado graúdo na produção dos concretos convencional e com resíduos desta pesquisa. A partir dela, verifica-se que se trata de uma brita granítica do tipo 1 e dos valores impressos de sua composição granulométrica, constatou-se diâmetro máximo característico de 19 mm e módulo finura igual a 6,95. Ressalta-se que, o material encontra-se na faixa da zona granulométrica 9,5/25 para agregados graúdos, conforme a norma NBR 7211/2009.

Figura 1: Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: Autor (2019).

Quanto as outras propriedades físicas do agregado analisado, a Tabela 3 informa os valores da sua massa específica real e unitária, bem como da sua taxa de absorção de água. Os valores obtidos deste agregados são comumente de faixas dimensionais utilizadas em pesquisas para produção de concretos (FUJIWARA, 2008; SILVEIRA, FIGUEIREDO e RÊGO, 2015; DINIZ et al., 2016; SHARMA et al., 2016).

Tabela 3: Propriedades físicas do agregado graúdo.

Propriedades	Valores
Massa Específica Real (g/cm ³)	2,69
Massa Específica Unitária (g/cm ³)	1,91
Absorção de água (%)	0,40

Fonte: Autor (2019).

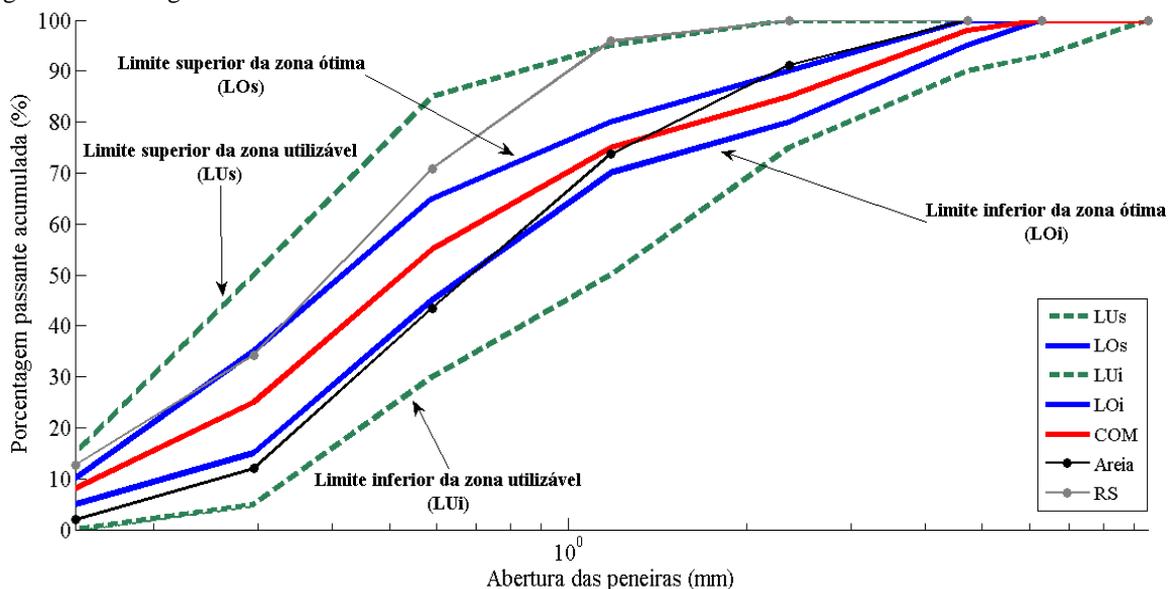
3.2 Areia e RS

São abordadas nesta seção os resultados referentes entres as propriedades físicas da areia e do RS, em que ambos misturados foram utilizados como agregado miúdo nas composições dos concretos sustentáveis produzidos.

Com relação à areia, pode-se verificar através da sua curva granulométrica (Figura 2), que o material ensaiado possui dimensão máxima característica de 4,75 mm e módulo de finura igual a 2,78, valor que caracteriza como areia média segundo a NBR 7211/2009, em que se permite variação de 2,20 a 2,90. Pode-se relatar que na faixa de abertura de peneiras compreendida entre 0,15 e 0,6 mm, há existência de material grosso, abaixo do limite inferior, os quais não permitem seu enquadramento na zona ótima de utilização da norma supracitada dentro desta faixa.

Com isto, a areia analisada encontra-se parcialmente inserida na zona ótima (entre as aberturas 1,18 e 2,36 mm) estabelecida pela NBR 7211/2009, caracterizando-a como um material médio mas com ligeira ausência de material fino na faixa 0,15 a 0,6 mm. Portanto, sua granulometria classifica este agregado miúdo em zona utilizável para concretos.

Figura 2: Curvas granulométricas da areia e do RS.



Fonte: Autor (2019).

Quanto ao RS, a Figura 2 ilustra sua curva granulométrica em que consta-se a caracterização de um material mais fino que areia, pois o diâmetro máximo encontrado foi de 1,18 mm e o módulo de finura de 1,87, valor este que classifica o RS como uma areia fina, conforme a NBR 7211/2009, em que se permite variação de 1,55 a 2,20.

A distribuição concentrada das partículas maiores do RS é encontrada entre as peneiras de abertura 0,6 e 1,18 mm e, analogamente à distribuição da areia, as partículas menores entre as aberturas 0,15 e 0,6 mm. As partículas mais finas estão situadas acima do limite superior da zona ótima. A partir de tal fator, não há seu enquadramento na zona ótima de utilização da norma supracitada dentro desta faixa, exceto para abertura de 0,3 mm. Desta forma, o RS analisado encontra-se fora da zona ótima estabelecida pela NBR 7211/2009 e caracterizado como um material fino. Portanto, pode-se ser classificado como um material em zona utilizável para agregado miúdo em concretos.

A Tabela 4 apresenta as propriedades físicas da areia e do RS, como forma de caracterizá-los para produção de concretos ou materiais cimentícios. Os valores obtidos de tais agregados são comumente faixas dimensionais utilizadas em pesquisas para produção de concretos (CHOI et al., 2009; BRAGA FILHO et al., 2010; CARLOS et al., 2010; ZHANG, ZAKARIA e HAMA YUKIO, 2013; SILVEIRA, FIGUEIREDO e RÊGO, 2015; PYO et al., 2018).

Tabela 4: Propriedades físicas da areia e do RS.

Propriedades	Agregados	
	Areia	RS
Massa Específica Real (g/cm ³)	2,64	2,80
Massa Específica Unitária (g/cm ³)	1,68	1,59

Fonte: Autor (2019).

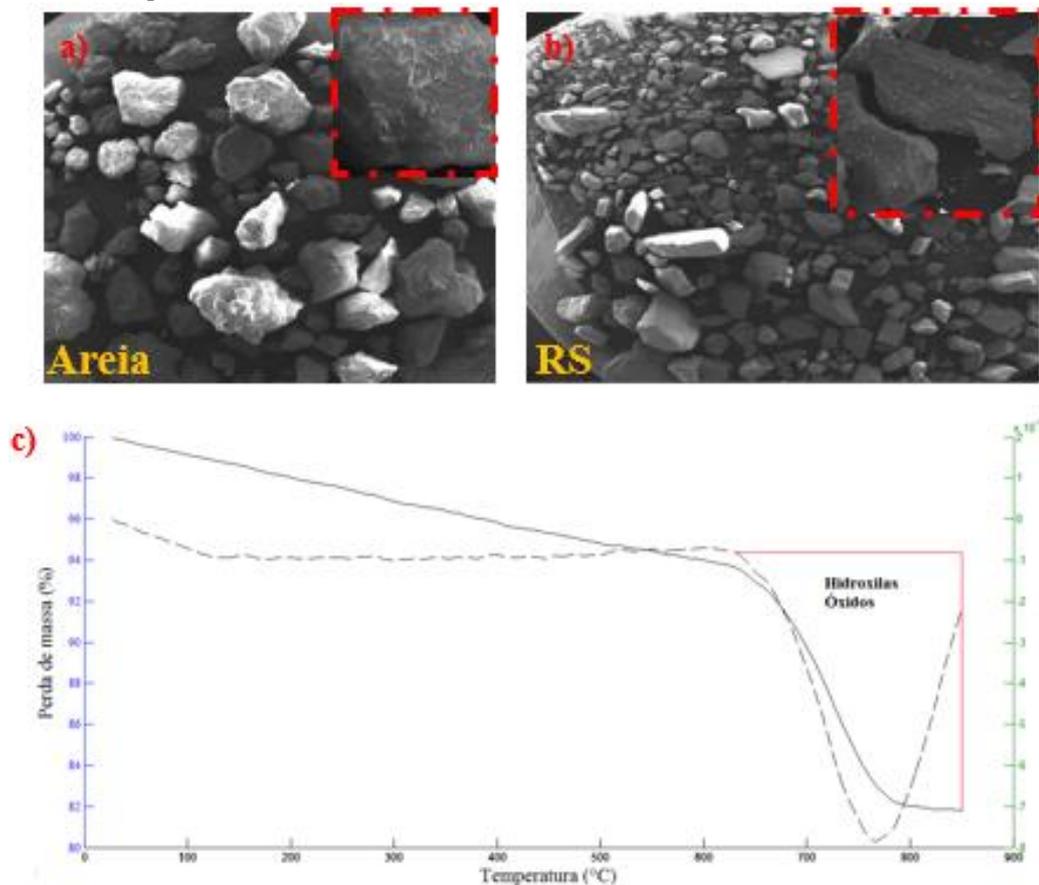
Com relação a forma da partículas, a areia possui formato esférico e estrutura maciça, já o RS possui formato lamelar em cubos e irregulares conforme microscopias realizadas por (PAIVA, 2013; GALVÃO, 2018; SEDIRA, GOMES e MAGRINHO, 2018). Pyo et al. (2018) utilizaram rejeito de mina de tungstênio em granulometria grossa e fina, e constataram por microscopia que, as partículas finas tinham formatos semelhantes das partículas do cimento utilizado, ou seja, partículas esféricas.

As Figuras 3a e 3b ilustram os MEVs da areia e do RS com ampliações para ambos de 30 e 300x (em detalhe), bem como a curva de TG/DTG (Figura 3c). A partir dessas imagens, verifica-se que os grãos de areia são esféricos e os de RS lamelares com material fino aderido em sua superfície. A termogravimetria do RS indica estabilidade térmica, pois a perda de

massa acentuada foi verificada apenas a partir de 650 °C, referentes às hidroxilas e óxidos presentes.

O RS foi utilizado nesta pesquisa como substituição parcial da areia, de modo que sua caracterização foi analisada como fator influenciador nas propriedades físicas dos concretos produzidos. Além disso, desde o processo de mistura, estado fresco e endurecido do concreto.

Figura 3: MEVs das partículas da areia e do RS com TG/DTG.



Fonte: Autor (2019).

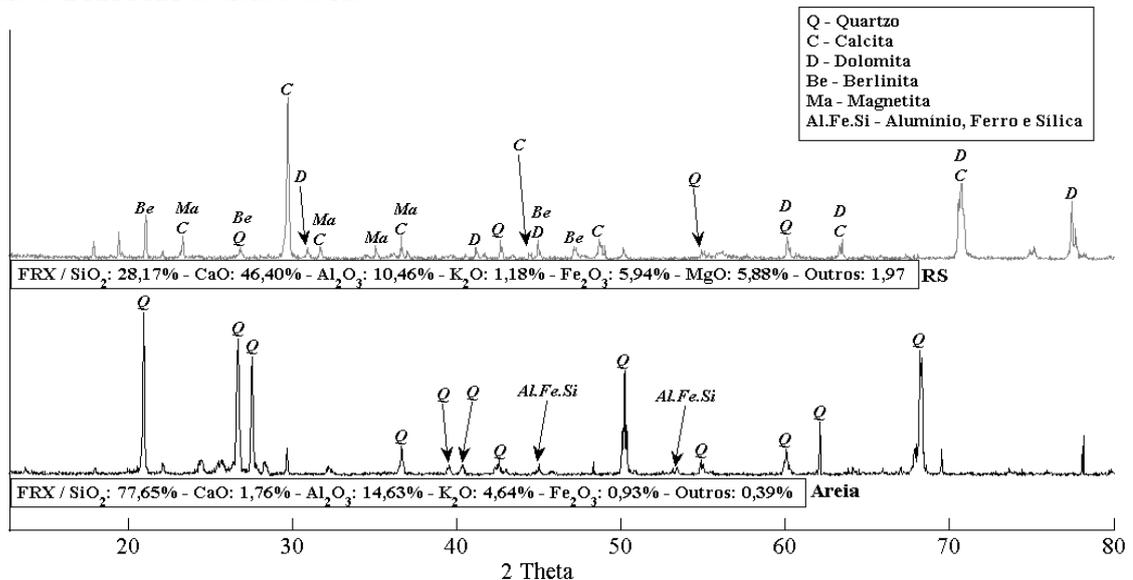
As análises químicas foram realizadas nos agregados através de ensaio de FRX, que corroboram compatibilidade com as fases cristalinas encontradas no ensaio de mineralogia através do DRX. Para tanto, a Figura 4 apresenta as fases dos elementos cristalinos encontrados na areia e no RS, bem como suas respectivas composições químicas mediante FRX.

Conforme esperado, o DRX realizado no agregado miúdo areia apresenta quase por totalidade picos de quartzo, pois sua composição química é composta por 77,65% deste componente (SiO_2), com impurezas de alumínio e ferro.

O RS possui alto teor de cálcio e sílica devido aos maiores picos identificados de calcita (com impureza de magnésio), quartzo e dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ em sua composição

mineralógica, fato que é confirmado mediante sua análise química. Essa maior quantidade se deve à associação de calcários cristalinos (mármore), por isso o RS em análise é rico em carbonatos (SOUZA, 2015). Há também a presença de berlinita (AlPO_4) em que o alumínio presente na sua composição química pode ser associado ao fósforo presente no material de britagem ou no solo onde é acondicionado o RS pela mina responsável.

Figura 4: DRX/FRX da areia e do RS.



Fonte: Autor (2019).

Mediante análise dos componentes químicos da areia e do RS, é possível verificar que enquanto a areia possui majoritariamente sílica em sua composição seguido de 14,63% de alumínio, o RS possui composição balanceada numa proporção de Ca/Si de 1,65 e com porcentagens em massa de alumínio, ferro e magnésio que totalizam cerca de 22,28%.

Desta forma, vale ressaltar que as maiores porcentagens de cálcio e sílica presentes no RS, na possibilidade de caráter reativo de material amorfo, podem contribuir para a melhoria da resistência do concreto, respectivamente em idades mais avançadas através de contribuição na atividade pozolânica e na formação de C-S-H nas primeiras idades. Entretanto, a quantidade de magnésio presente, embora pequena pode ocasionar reações expansivas no concreto endurecido (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Diante da composição química e mineralógica, pesquisas realizadas com RS constataram componentes e identificações similares em aplicações em compósitos *purm* em isolantes térmicos, de rodoviárias e de concretos (PAIVA, 2013; GERARB, 2014; GALVÃO, 2018).

A Tabela 5 fornece as informações para o estabelecimento da atividade pozolânica e caráter aglomerante do RS (em classe E) mediante os parâmetros exigidos pela ABNT e

ASTM C 618 (em classe N). Os resultados demonstram que o tamanho das partículas foi bastante superior àquele padronizado, devido ao fato de se tratar de um resíduo grosso que possui dimensões que o caracterizam com areia fina, mas não fino como partículas de cimento. Com relação ao somatório de óxidos de sílica, alumínio e ferro, a percentagem foi inferior ao exigido.

Tabela 5: Propriedades químicas para determinação do índice de atividade pozolânica.

Propriedades	NBR 12653/2014	ASTM C 618	RS (%)
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (% min.)	50	70	44,57
SO ₃ (% máx.)	5	4	0,56
Partículas > 45 µm (% máx.)	34	34	100
Perda ao fogo (%)	10	10	14,24

Fonte: Autor (2019).

Quanto a obtenção do índice de atividade pozolânica em relação ao desempenho com cimento Portland aos 28 dias, o RS obteve 52,44% dos 75% para o enquadramento com material pozolânico. Diante desses parâmetros, pode-se mencionar a reduzida atividade pozolânica desse resíduo, mediante também do moderado teor de sílica contido e da sua granulometria sem nenhum tipo de beneficiamento prévio.

Vale ressaltar que, embora a substituição do RS não tenha sido pelo cimento, no processo químico da mistura na produção do concreto, poderia haver interações através de reações químicas dos componentes não cristalinos presentes. Análises específicas da matriz cimentícia de concretos com RPP e RS em FRX e MEV combinada ao refinamento de DRX tanto da pasta de cimento quanto dos resíduos, podem estimar tais interações.

Quanto ao teor de hidróxido de cálcio fixado, através do método de Chapelle modificado da NBR 15895/2010, indica pozolanicidade inexistente do RS. Pois o consumo foi de 168,17 mg de Ca(OH)₂/g de pozolana, o qual é inferior à 436 mg de Ca(OH)₂/g de adição apresentado por materiais considerados pozolânicos. Resultado em referência ao consumo mínimo de 330 mg CaO/g de pozolana proposto por Raverdy et al em 1980 (RÊGO et al., 2015), que corrigido para consumo de hidróxido de cálcio equivale à 436 mg.

Para o ensaio indireto de pozolanicidade através da condutividade elétrica também não se verificou potencial reativo, tendo em vista que as diferenças de condutividade elétrica medidas foram de 0,01 a 0,16 mS/cm de 120 a 7200 s. Fato que qualifica o RS como material não pozolânico, pois tais diferenças foram inferiores a 0,4 mS/cm (LUXÁN, MADRUGA e SAAVEDRA, 1989). A alta perda ao fogo também é fator influenciador à baixa pozolanicidade.

3.3 Cimento e RPP

A Tabela 6 apresenta os resultados referentes à caracterização e às propriedades do cimento utilizados nesta pesquisa, CP V ARI RS.

Todos os valores representados na Tabela 6 estão em conformidade com as regulamentações da NBR 16697/2018, cimento similar ao tipo III da *ASTM C 150-07* e ao CEM I 52.5 da EN 197-1 (STEINER, BERNARDIN e PELISSER, 2015; MATOS et al., 2018b).

Tabela 6: Propriedades do cimento.

Propriedades do Cimento CP V ARI RS	
Tempo de início de pega (h)	2,17
Fim de pega (h)	2,67
Expansibilidade a frio (mm)	3,62
Expansibilidade a quente (mm)	0,383
Finura do Cimento (%)	2,60
Resistência à compressão aos 1, 3 e 7 dias (Mpa)	14,20 – 24,65 – 34,15
Massa específica Real (g/cm ³)	3,05
Massa específica Unitária (g/cm ³)	1,00
Perda ao fogo (%)	2,95

Fonte: Autor (2019).

O RPP por ser um material bastante fino após seu beneficiamento realizado, apresentou partículas inferiores àquelas encontradas no cimento e valores de massa específica real e massa unitária, respectivamente, iguais a 2,47 e 0,63 g/cm³. Em comparativo com cimento, sua finura e tamanho das partículas puderam ser aferidos através dos ensaios do Blaine e granulometria a laser, tais resultados são apresentados na Figura 5 e na Tabela 7.

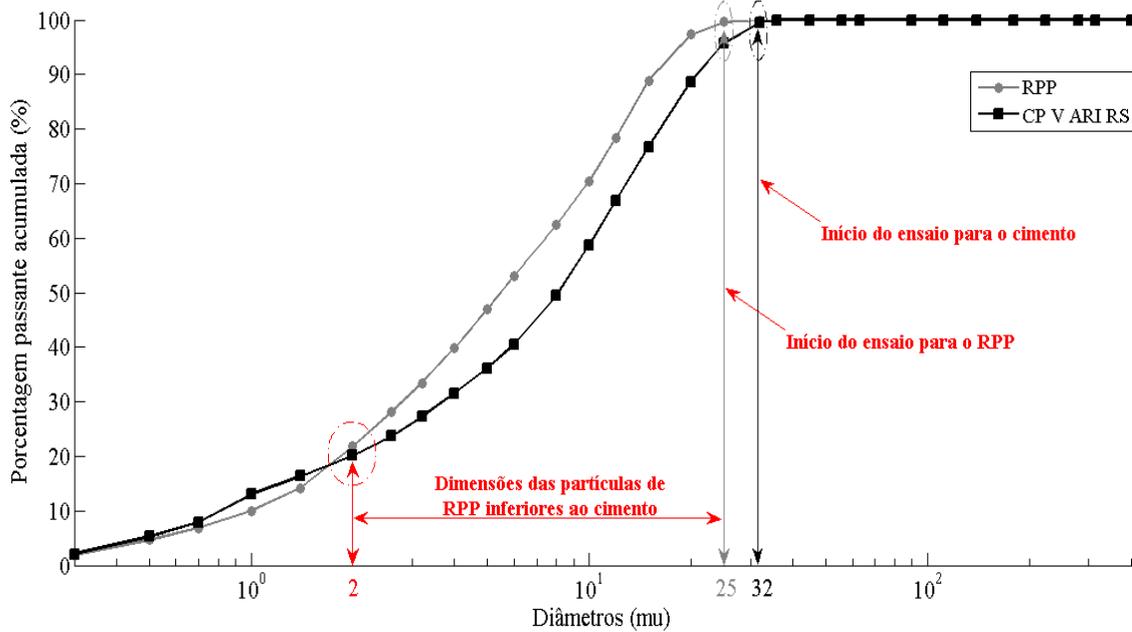
Tabela 7: Finura e tamanho das partículas do cimento e do RPP.

Propriedades	Materiais	
	CP V ARI RS	RPP
Finura Blaine(cm ² /g)	4442	10765
Diâmetro médio (µm)	9,60	7,20
D ₁₀ , D ₅₀ , D ₉₀ (µm)	0,81 – 8,11 – 20,91	1,00 – 5,48 – 15,61

Fonte: Autor (2019).

Da Tabela 7, corrobora-se que o tamanho das partículas do RPP são menores que o cimento, exceto para D₁₀. Também pode ser mencionado que a finura do RPP é duas vezes maior que o cimento. Jacoby e Pelisser (2015) obtiveram partículas de RPP com valores D₁₀, D₅₀ e D₉₀, respectivamente de, 1,76, 7,59 e 23,61 com diâmetro médio de 10,14 µm.

Figura 5: Granulometrias a laser do cimento e do RPP.



Fonte: Autor (2019).

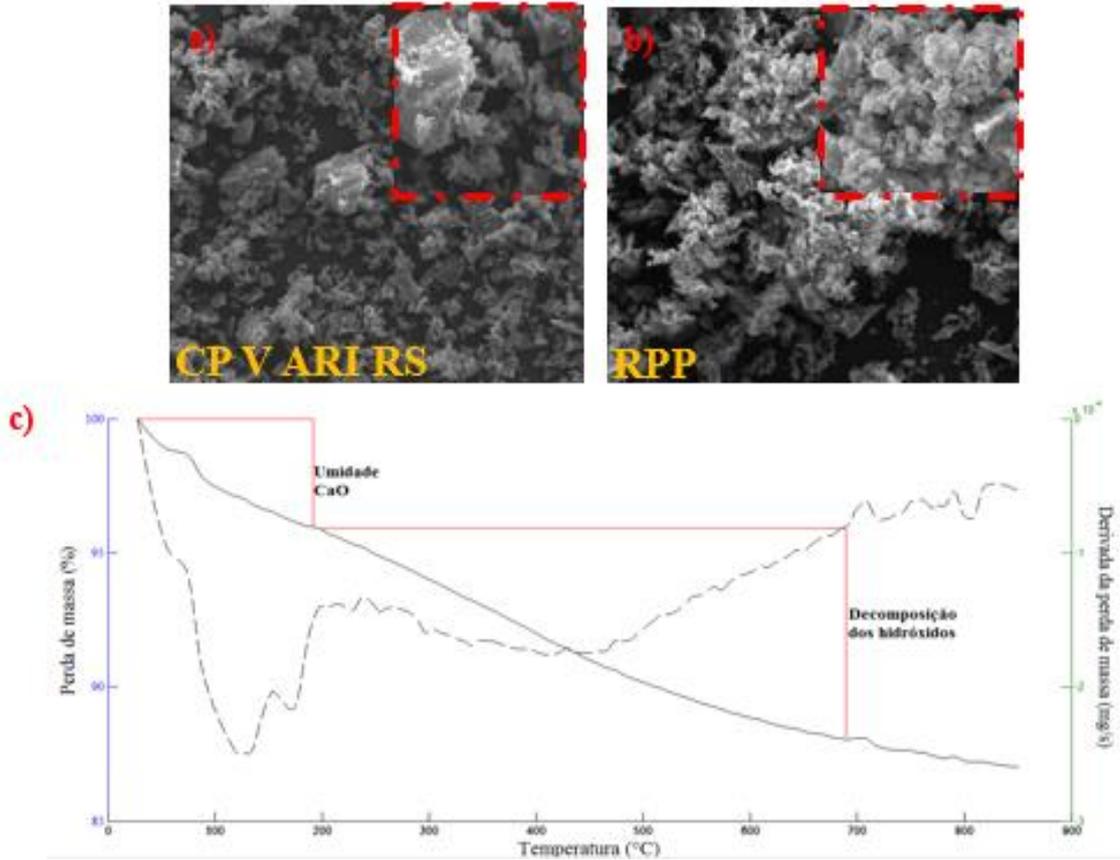
Na Figura 5, pode-se constatar que o RPP é um material de granulometria menor que o cimento. Isso pode ser verificado entre os diâmetros 2 e 25 μm , em que a quantidade passante de RPP é superior ao cimento. Analogamente, verifica-se também que enquanto o ensaio de granulometria do cimento inicia-se no diâmetro 32 μm , ou seja, com a primeira percentagem retida deste material em 0,48% (passando 99,52% em volume); o RPP tem sua primeira no diâmetro imediatamente menor (25 μm), com primeira percentagem de retenção de 0,32% (passando 99,68% em volume).

As Figuras 6a e 6b ilustram os MEVs do cimento e do RPP com ampliações para ambos de 1000 e 4000x (em detalhe). A partir deles sugere-se que as partículas de RPP possuem menores dimensões, entretanto, formam estruturas aglutinadas, enquanto as partículas do cimento são relativamente difusas.

A termogravimetria do RPP (Figura 6c) indica dois estágios de perda de massa, até 200 $^{\circ}\text{C}$ perda de massa associada à umidade de óxido de cálcio (CaO) e entre 200-700 $^{\circ}\text{C}$ decomposição de hidróxidos. Ressalta-se também que, o RPP também possui estabilidade térmica, pois é um material que sofreu processos de calcinação na indústria cerâmica.

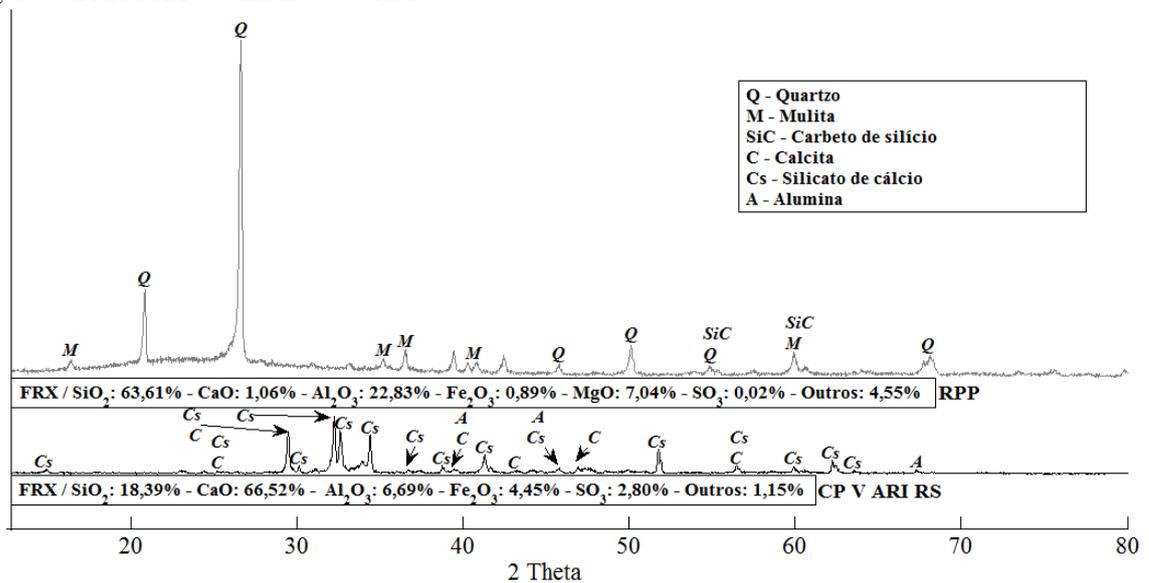
No ensaio de mineralogia do cimento, constata-se picos majoritários de silicato de cálcio seguidos de calcita. Tais componentes corroboram com os resultado do FRX apresentado na Figura 7, que informa o cálcio como elemento mais presente (66,52%).

Figura 6: MEVs das partículas do cimento e do RPP com TG/DTG.



Fonte: Autor (2019).

Figura 7: DRX/FRX do cimento e do RPP.



Fonte: Autor (2019).

Na Figura 7, nota-se quase todos picos de componentes compostos por cálcio e sílica, na maioria deles, silicato de cálcio e calcita, resultado conforme com a composição química do cimento CP VARI RS. Quanto ao RPP (Figura 7) verificou-se a presença de maiores picos para o quartzo, bem como a identificação de mullita e carbeto de silício. Segundo Souza

(2007) a mulita é proveniente da massa porcelânica e o carbeta de silício oriundo do processo de abrasão do polimento do porcelanato.

Os picos de quartzo encontrados na mineralogia são correspondentes à quantidade majoritária de sílica presente em sua composição química mediante análise de FRX, a presença de alumínio deve-se à mulita e o magnésio por conta do desgaste abrasivo magnésiano dos discos no processo de polimento, identificadas no DRX. Para o cimento, a análise química demonstrou-se típica de cimento Portland CP V ARI, com cálcio e sílica como seus principais componentes (BREITENBACH, 2013; JACOBY e PELISSER, 2015).

A composição química do RPP possui valores em porcentagens similares ao levantamento apresentado por (WANG et al., 2016) em resíduos cerâmicos e área específica superior a 3000 cm²/g.

Ressalta-se que a substituição do RPP em massa no cimento, implica um incremento de sílica presente na composição do concreto, uma vez que sua quantidade presente no resíduo é bastante alta (63,61%) e praticamente igual a quantidade de cálcio no cimento (66,52%), o qual é o valor majoritário. De modo que os valores de Ca e Si são análogos em ambos materiais. E, como consequência, tal adição de sílica pelo RPP pode contribuir para formação de C-S-H, sobretudo, em idades mais avançadas do concreto através de atividade pozolânica (MATOS et al., 2018b).

O RPP foi classificado como um material do tipo N para as normas brasileira e americana, respectivamente, ABNT e ASTM, na avaliação de sua atividade pozolânica. Os resultados desses ensaios estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Propriedades químicas para determinação do índice de atividade pozolânica.

Propriedades	NBR 12653/2014	ASTM C 618	RPP (%)
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (% min.)	70	70	87,33
SO ₃ (% máx.)	4	4	0,02
Partículas > 45 µm (% máx.)	34	34	0,00
Perda ao fogo (%)	10	10	3,33

Fonte: Autor (2019).

Da análise da Tabela 8, constata-se que o somatório de óxidos (Si, Al e Fe) encontrados na composição química do RPP foi 87,33% superior ao mínimo exigido pelas normas da ABNT e ASTM, bem como o valor de óxido de enxofre foi bem menor que o máximo previsto por tais regulamentações, ou seja, 0,02%. Por se tratar de um material bastante fino, devido ao seu beneficiamento, não se obtiveram partículas que fossem superiores a 45 µm, assim como o cimento utilizado, informações provenientes da suas respectivas curvas granulométricas ilustradas na Figura 5.

Quanto aos índices de desempenho pozolânicos obtidos pela resistência das argamassas no cimento Portland aos 28 dias (NBR 5752/2014), verificou-se valor de 86,74%. Desta forma, obtendo pozolanidade para o cimento com valor 11,74% acima do estabelecido. Penteadó, Carvalho e Lintz (2016) obtiveram 76,5% de índice de pozolanidade para o cimento Portland, argumentando que o RPP tem propriedades pozolânicas.

Steiner, Bernardin e Pelisser (2015) avaliaram o mesmo índice para misturas com teores 10 a 40% de RPP, e constataram que apenas o teor de 40% não obteve valor acima de 75% em relação à resistência à compressão da argamassa padrão. A caracterização química foram identificadas percentagens similares de sílica, alumínio, ferro e cálcio; e fase cristalina predominante de quartzo, que pode ser considerado reativo por conta do halo amorfo presente numa faixa de 18 e 36° em varredura de 2 θ .

Quanto ao teor de hidróxido de cálcio fixado, através do método de Chapelle modificado da NBR 15895/2010, indica pozolanidade reativa do RPP. Pois o consumo foi de 595,06 mg de Ca(OH)₂/g de pozolana, o qual é superior à 436 mg de Ca(OH)₂/g de adição apresentado por materiais considerados pozolânicos.

Para o ensaio indireto de pozolanidade através da condutividade elétrica, foram aferidos os seguintes resultados segundo a Tabela 9. A atividade pozolânica aferida através do método da condutividade elétrica além medição de 120 segundos proposta por (LUXÁN, MADRUGA e SAAVEDRA, 1989), foram verificadas para os tempo de 1200 (BARROSO, 2011) e 7200 segundos.

Tabela 9: Medições da condutividade elétrica para atividade pozolânica.

Resíduo	Variação da condutividade elétrica (mS/cm)		
	120 s	1200 s	7200 s
RPP	0,46	0,63	0,98

Fonte: Autor (2019).

Das variações da condutividade elétrica apresentada na Tabela 9 para as medições de 120, 1200 e 7200 segundos, verificou-se moderada pozolanidade, pois todos valores foram enquadrados na faixa de 0,4 e 1,2 mS/cm (LUXÁN, MADRUGA e SAAVEDRA, 1989). A baixa perda ao fogo similar ao cimento, também é um fator influenciador no caráter pozolânico do RPP.

3.4 Mistura otimizada entre areia e RS – 1º Critério

Mediante as curvas granulométricas ilustradas nas Figuras 2 e 3, foi constatado que tanto a areia quanto o RS estão fora da zona ótima para utilização como agregados miúdos, de

acordo com a NBR 7211/2009. De modo que para a areia, somente as partículas retidas na peneira de abertura 1,18 mm estão compreendidas em tal zona e, para o RS, apenas as partículas retidas na peneira de abertura 0,3 mm, além das peneiras 4,8, 6,3 e 9,5 mm para ambas as curvas. Desta forma, esses são materiais classificados em zona utilizável para concreto, sendo a areia o material mais grosso e o RS de granulometria mais fina.

Com isto, buscou-se obter uma mistura otimizada, a qual fosse classificada em zona ótima, sendo que o somatório dos quadrados dos erros desta curva em relação a Curva Ótima Média (COM) teórica, obtida das médias entre os limites inferiores e superiores da norma supracitada, fosse mínimo. Para tanto, utilizou-se as porções de areia retidas nas peneiras 1,18, 2,36 e passante na 4,8 mm para serem misturadas com o RS de granulometria apresentada na Figura 2.

Entretanto, antes de terem sido realizadas essas misturas, a ferramenta *GRG* de minimização pertencente ao SOLVER do MS EXCEL, simulou os valores de TFD para cada composição de mistura proposta, bem como calculou seus respectivos erros através do MMQ das misturas em relação à COM. A Figura 8 ilustra as curvas e a Tabela 10 apresenta a otimização dos TFDs e seus respectivos erros.

A escolha do TFD em relação à minimização dos erros das composições granulométricas foi considerado pelo somatório dos quadrados dos erros da série de peneiras, conforme Tabela 1.

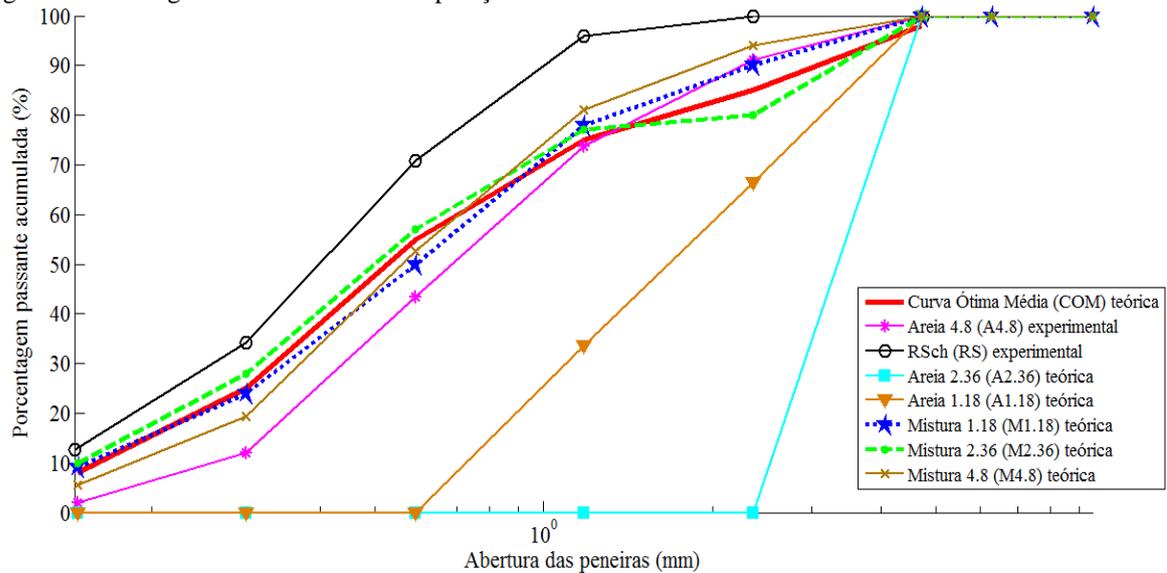
Tabela 10: Composições granulométricas otimizadas.

Mistura	Composição	TFD (%)	$ P_{COM}-P_M ^{2(1)}$	$\Sigma P_{COM}-P_M ^{2(2)}$
A4.8	A4.8	0,00	0,0169	0,0380
RS	RS	100	0,0435	0,1024
M4.8	A4.8+RS	33,26	0,0083	0,0167
M1.18	A1.18+RS	70,94	0,0027	0,0066
M2.36	A2.36+RS	80,45	0,0021	0,0049

⁽¹⁾ Maior erro pelo MMQ da série de peneiras, ⁽²⁾ Somatório dos erros pelo MMQ da série de peneiras - P_{COM} : Material passante acumulado nas peneiras da COM, P_M : Material passante acumulado nas peneiras das Misturas. Fonte: Autor (2019).

Na Figura 8, pode-se verificar graficamente que as curvas mais próximas da COM, foram provenientes das misturas teóricas M1.18 e M2.36. Tal fato é confirmado pelos resultados da Tabela 10, pois essas misturas apresentaram menores erros, além de indicarem o uso de maiores valores de TFD, respectivamente, 70,94 e 80,45%.

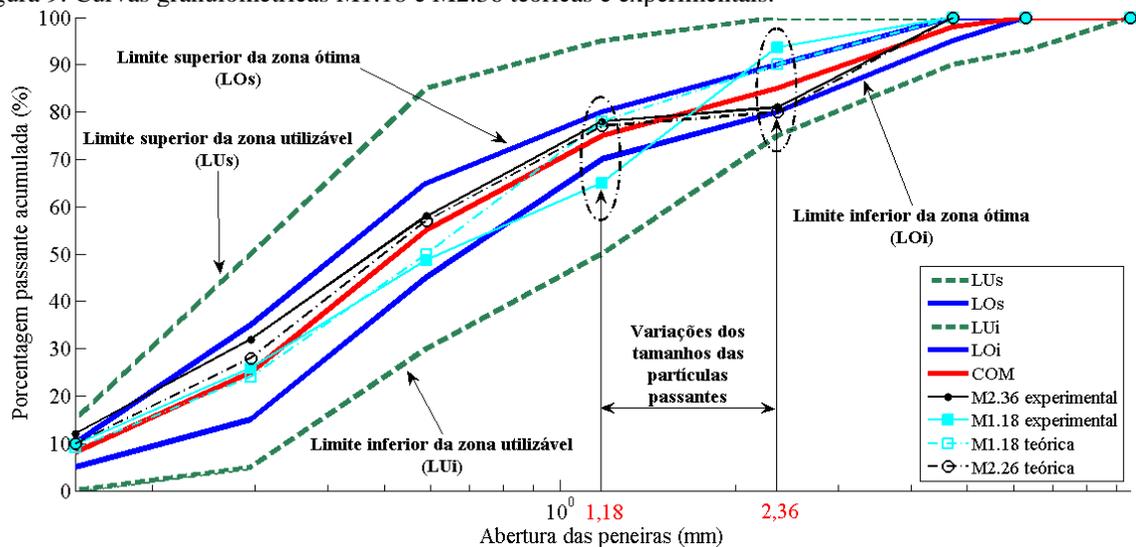
Figura 8: Curvas granulométricas das composições.



Fonte: Autor (2019).

A Figura 9 ilustra o enquadramento das curvas teóricas M1.18 e M2.36 entre as zonas utilizável e ótima regulamentada pela NBR 7211/2009, bem como suas respectivas curvas experimentais obtidas pelo ensaio de granulometria. Infere-se também que, houve pequenas variações entre as curvas M2.36 teórica e experimental e um pouco maiores para M1.18. As variações entre as curvas teóricas e experimentais dessas misturas estão apresentadas na Tabela 11.

Figura 9: Curvas granulométricas M1.18 e M2.36 teóricas e experimentais.



Fonte: Autor (2019).

Nota-se que para M1.18 experimental entre as peneiras 1.18 e 2.36 mm há maior variação dos tamanhos das partículas e o erro absoluto em relação a sua curva teórica comparado à M2.36 é superior, respetivamente, 13 e 3,7% para os ensaios de granulometria

realizados, e estão fora da zona ótima. Enquanto a curva M2.36 experimental entre as mesmas peneiras há uniformidade de partículas, mas se mantém dentro zona ótima assim como sua curva teórica e o erro absoluto entre elas é de 1,0% em ambas peneiras. Ressalta-se que o erro absoluto da peneira 1.18 mm da M1.18 é 3,25 vezes superior ao estabelecido pela NBR 7211/2009, $\pm 4\%$.

A Tabela 11 traduz que a curva M2.36 é a composição granulométrica mais viável para a produção do concreto com RS desta pesquisa. Pois além de apresentar menores erros pelo MMQ, o maior erro absoluto entre as peneiras está dentro do permitido, 4%; há o maior aproveitamento do resíduo, haja vista que o TFD é de 80,45% em massa na substituição da areia, para valor prático de mistura 81%.

Tabela 11: Erros entre as curvas teóricas e experimentais (M1.18 e M2.36).

Mistura	Composição	TFD (%)	$ P_{MT}-P_{ME} $ (%) ⁽¹⁾	$\Sigma P_{MT}-P_{ME} $ (%) ⁽²⁾
M1.18(teórica)/M1.18 (experimental)	A1.18+RS	66,52	13,00	20,70
M2.36(teórica)/M2.36 (experimental)	A2.36+RS	80,45	4,00	9,00

⁽¹⁾ Maior erro absoluto da série de peneiras, ⁽²⁾ Somatório dos erros absolutos da série de peneiras – P_{MT} : Material passante acumulado nas peneiras das Misturas teóricas, P_M : Material passante acumulado nas peneiras das Misturas Experimentais.

Fonte: Autor (2019).

Por fim desta análise, foram calculadas as massas unitárias de misturas entre a areia retida na peneira 2.36 mm, com teores de RS de 70, 80 e 90% em substituição em massa. Pois, os resultados outorgados pelos cálculos método *GRG* do SOLVER e dos erros pelo MMQ em relação a COM, conforme discutido anteriormente, indicaram que a melhor porcentagem a ser do utilizada do resíduo seria de 81%. Os resultados das massas unitárias provenientes dessas misturas estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Massas unitárias de misturas entre areia e o RS.

Mistura	Composição	RS (%)	Massa Unitária (g/cm ³)	DC(%) ⁽¹⁾
A4.8(experimental)	A4.8	0	1,68	-
M2.36(experimental)	A2.36+RS	70	1,86	+10,71
M2.36(experimental)	A2.36+RS	80	1,81	+7,74
M2.36(experimental)	A2.36+RS	90	1,80	+7,14

⁽¹⁾ Desvio para Controle em relação à Areia.

Fonte: Autor (2019).

Das massas unitárias obtidas das misturas, verifica-se que houve aumento de todas elas em relação àquelas obtidas pela areia e o RS apresentados na Tabela 4. Desta forma, melhorando o empacotamento (a compacidade) das misturas dos agregados de 7,14 a 10,71% em relação à areia passante na peneira 4,8 mm ilustrada na Figura 2, e que dá suporte ao uso

de 81% de RS escolhido em substituição da areia. Tal fato se deve às faixas de tamanhos das partículas misturadas entre a porção grossa da A2.36 com material fino característico da curva do RS.

3.5 Melhor teor de RPP – 2º Critério

A escolha do teor de RPP mais viável para substituição do cimento na produção dos concretos foi embasada nas análises das propriedades do estado fresco e endurecido do concreto convencional, com porcentagens em massa de RS ($TFD=81\%$) e 5 a 30% de RPP.

Vale ressaltar que, o traço T81/0 foi produzido apenas com substituição parcial da areia; ou seja, utilizando o TFD calculado. Desta forma, para esse, tem-se a seguinte composição de mistura: 1:0,4785:2,2 e 1,3365 de RS com relação água/cimento de 0,4 e 0,5% de aditivo superplastificante. Tal concreto foi utilizado com controle para as comparações da ANOVA nas propriedades do estado endurecido.

No estado fresco foi verificada a trabalhabilidade dos concretos produzidos através do ensaio consistência, a partir do abatimento do *slump test*. Mediante a Tabela 13, pode-se verificar os abatimentos dos concretos produzidos, com efeito, apresentando o comportamento plástico quanto à trabalhabilidade.

Tabela 13: Resultados do ensaio do abatimento dos concretos.

Traços	Slump (mm)	DC(%) ⁽¹⁾
REF	140	0,00
T81/0 ⁽²⁾	140	-
T81/5	95	- 32,14
T81/10	90	- 35,71
T81/15	135	- 3,57
T81/20	18	- 87,14
T81/25	12	- 91,42
T81/30	10	- 92,86

⁽¹⁾ Desvio para Controle em relação ao REF, ⁽²⁾ Traço de controle.

Fonte: Autor (2019).

A Tabela 13 apresenta a trabalhabilidade dos concretos produzidos através do abatimento medido durante o ensaio. Dentre esses valores de abatimentos medidos, verifica-se que o concreto com substituição parcial apenas do RS (T81/0) apresentou os mesmos 14 cm de *slump* obtido pelo REF. Para os demais, constata-se diminuições nas consistências, de modo que a redução foi maior para os concretos produzidos com teores de RPP a partir de 20%, pois o DC para esses traços tiveram reduções de 87,14 a 92,68% em relação ao concreto de controle. Para o maior teor de substituição, o T81/30, a trabalhabilidade aferida foi mínima, ou seja, 10 mm de *slump*, segundo a NBR NM 67/1998.

Diante desses resultados, os traços com substituição que tiveram melhores abatimentos foram aqueles com substituições de 5 a 15% de RPP, em que para as substituições de 5 e 10% houve redução de 32,14% e 35,71% na consistência. E, para o T81/15, a redução foi a menor de todas, apenas 3,57%, desta obtendo a melhor trabalhabilidade entre os concretos com as substituições de resíduos propostas: 13,5 cm.

As reduções da trabalhabilidade nos traços produzidos podem ser atribuídas ao formato das partículas, pois partículas laminares e irregulares como o RS, tendem a serem mais rugosas e, conseqüentemente, aumentarem o atrito interno entre elas. Esse fato além da compactidade, pode ser fator influenciador na massa específica dos concretos produzidos com resíduos. A dimensão do RPP inferior ao cimento, também pode ter influenciado nesta propriedade, pois partículas finas e porosas tendem a aumentar o consumo de água (WANG et al., 2016).

Torkittikul e Chaipanich (2010) avaliaram a trabalhabilidade de concretos com substituição de resíduo cerâmico de 50 a 100% em relação a massa de areia e verificaram que houve diminuição desta propriedade. Pequena para substituição de 50% com 8,3% em relação ao concreto de referência e abatimento ínfimo de 5 mm para 100% de substituição, resultando numa redução de 95,45%. Fato atribuído à forma angular e irregular das partículas.

Penteado, Carvalho e Lintz (2016) substituíram de 5 a 30% de RPP para produção de concretos em relação a massa de cimento e de areia. Com efeito, verificaram que a trabalhabilidade desses concretos reduziram com o aumento dos teores desse resíduo, de modo que o tamanho e a porosidade foram fatores influenciadores no aumento da demanda de água e, conseqüentemente, na redução da trabalhabilidade do concreto. A redução do *slump* de concretos com RPP substituído no cimento foi de até 40% em relação ao concreto de referência e, comparado aos concretos com substituição da areia, os valores dos abatimentos foram inferiores até o teor de 15% de RPP.

Awoyera, Akinmusuru e Ndambuki (2016) utilizaram resíduo cerâmico como substituição parcial de material fino e grosso em concretos e verificaram valores de *slump* entre 50 e 90 mm, porém, menores em relação aos valores obtidos por concretos com agregado natural.

Paiva (2013) utilizou RS em substituição parcial da areia na produção de concretos e constatou valores trabalhabilidade igual ou superior ao concreto de referência com mistura convencional, a partir do ensaio de *slump test*.

Choi et al. (2009) utilizaram proporções de 0 a 30% de resíduo de mina de tungstênio em substituição parcial do cimento na produção de argamassas e constataram que a plasticidade reduz de forma inversamente proporcional ao aumento do teor desse resíduo.

Benarchid et al. (2018) produziram concretos de relação água/cimento de 0,4 (sem aditivo superplastificante) com resíduos de mineração de ouro como agregados miúdo e graúdo e com agregados naturais comerciais. Nesse estudo, verificaram melhoria no abatimento dos concretos com resíduos acima de 25 mm em relação ao concreto de mistura convencional de controle.

A Tabela 14 apresenta os resultados referentes ao estado endurecido dos concretos produzidos aos 28 dias. Nesta etapa, foram realizados os ensaios de absorção e porosidade total, resistência à compressão. Para análise desses resultados, foi utilizada ANOVA de um fator para aferir o teor de RPP mais viável para produção de concretos sustentáveis.

Tabela 14: Resultados das propriedades do estado endurecido dos concretos.

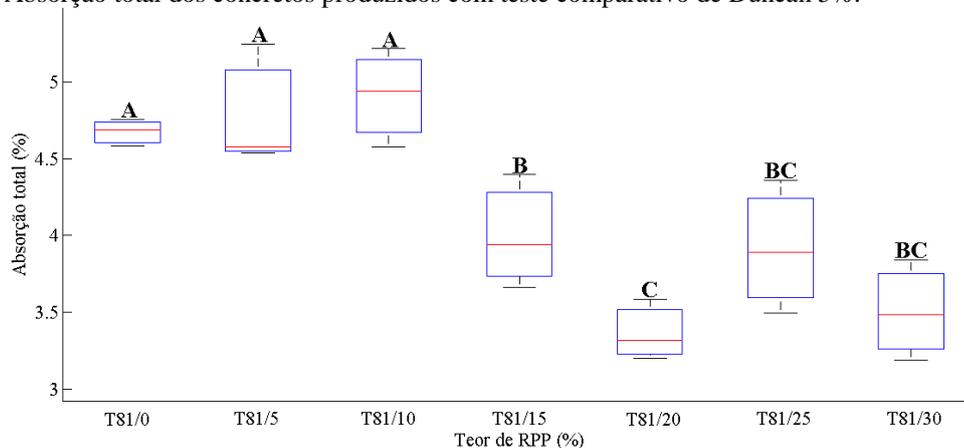
Traço	Resistência à compressão (MPa)			Absorção (%)			Porosidade (%)		
	Média/(DP) ⁽¹⁾	IC 95% ⁽²⁾	C ⁽³⁾	Média/(DP)	IC 95%	C	Média/(DP)	IC 95%	C
REF	47,57 (0,85)	2,1	-	5,10 (0,10)	0,24	-	11,71 (0,20)	0,5	-
T81/0	51,21 (2,02)	5,0	A	4,67 (0,08)	0,22	A	11,08 (0,23)	0,6	AB
T81/5	50,32 (0,79)	2,0	A	4,79 (0,40)	0,98	A	11,29 (0,88)	2,2	B
T81/10	46,78 (1,04)	2,6	B	4,91 (0,30)	0,79	A	11,49 (0,70)	1,7	AB
T81/15	46,38 (1,06)	2,6	B	4,00 (0,37)	0,92	B	9,44 (0,82)	2,0	C
T81/20	45,36 (0,33)	0,8	B	3,37 (0,19)	0,49	C	9,89 (0,47)	1,2	AC
T81/25	42,54 (0,88)	2,2	C	3,91 (0,40)	1,07	BC	11,00 (0,90)	2,3	AB
T81/30	40,85 (0,60)	1,5	C	3,51 (0,33)	0,81	BC	8,31 (0,75)	1,9	C

⁽¹⁾ Desvio Padrão amostral, ⁽²⁾ Intervalo de Confiança, ⁽³⁾ Comparação entre a médias: letras iguais não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5% de significância.

Fonte: Autor (2019).

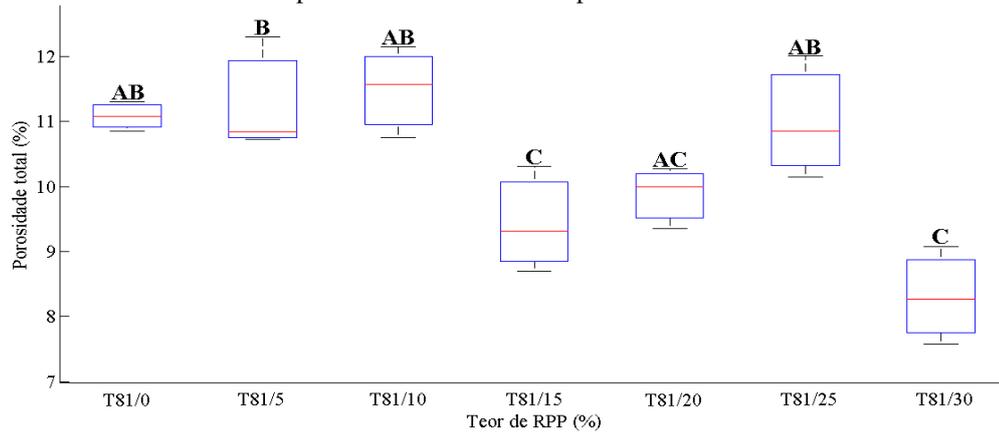
As Figuras 10 e 11 ilustram os resultados referentes aos ensaios de absorção e porosidade total. Dos valores de absorção, verifica-se que até 10% de substituição parcial de RPP, não houve variação estatística significativa das amostras submetidas à esse ensaio, com 95% de confiança pelo teste de Duncan em relação ao traço T81/0.

Figura 10: Absorção total dos concretos produzidos com teste comparativo de Duncan 5%.



Fonte: Autor (2019).

Figura 11: Porosidade dos concretos produzidos com teste comparativo de Duncan 5%.



Fonte: Autor (2019).

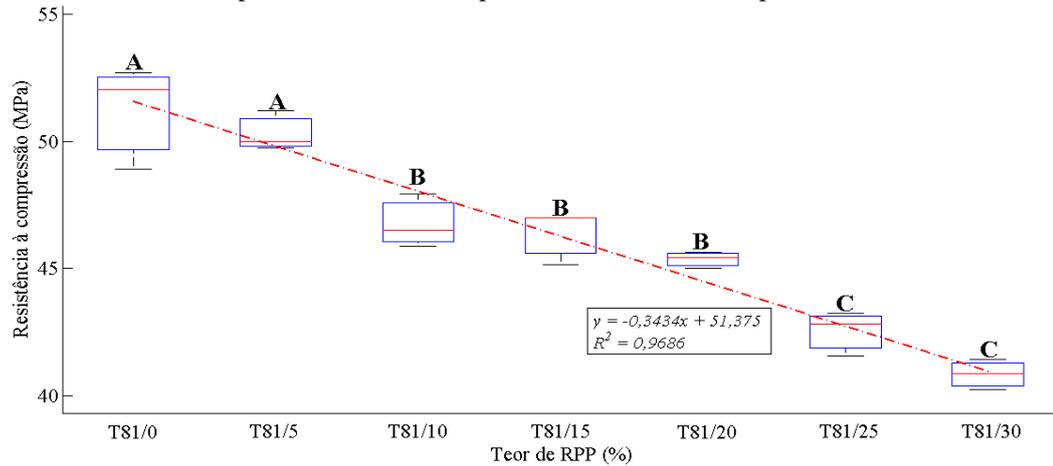
Nesta faixa, constata-se os maiores valores de absorção dos traços produzidos, de 4,67 a 4,91%. Os concretos produzidos com 15 e 20% de RPP tiveram variação estatística significativa em relação aos demais traços, sendo o T81/20 o menor valor encontrado, 3,37% de absorção. Para os teores de 25 e 30% de RPP não houve variação estatística significativa entre eles, porém, com interações com o teores de 15 e 20% de RPP.

Os resultados provenientes das porosidades obtidas traduziram que houve interações estatísticas significativas entre as os traços com teores de RPP de 0, 10 e 25%, sem variações significativas entre suas médias a 5% de significância pelo teste de Duncan. Ressalta-se que o maior valor de porosidade aferido foi para o traço T81/10 com 11,49%, e o menor para T81/30, mas sem diferenciação estatística significativa de valores médios com o traço T81/15, sendo portanto valores de porosidades respectivamente de, 8,31 e 9,44%.

Nota-se que os resultados da absorção dos concretos apresentaram baixos DPs relativos entre as médias dos traços produzidos, variando de 0,08 a 0,40%. E, apenas para o T81/0 quanto a porosidade, pois os DPs foram de 0,47 a 0,90%, valor máximo este superior duas vezes aos dados da absorção. Ainda verifica-se que os maiores valores de IC estão associados aos maiores valores de DP das médias amostrais em um determinado traço, bem como em relação ao REF, todos traços com teores de RPP e 81% de RS foram melhores nessas propriedades.

Da Figura 12, é notório que os resultados referentes à resistência à compressão tiveram relação inversamente linear com o teor de RPP, para um fator de correlação de R^2 igual a 0,9686. Isto é, para teores de 0 a 30% de RPP nestas condições de materiais e misturas, a reta $y = -0,3434x + 51,375$, relaciona as variáveis teor de RPP e resistência à compressão em 96,86%.

Figura 12: Resistência à compressão dos concretos produzidos com teste comparativo de Duncan 5%.



Fonte: Autor (2019).

Ademais, a partir das comparações entre as médias dos traços por ANOVA e teste de Duncan com 95% confiança, infere-se que o comportamento desses traços quanto a esta propriedade, pode ser dividida em três faixas sem diferenciação estatística significativa entre os teores de: 0-5%, 10-20% e 25-30%.

Em relação ao REF, verifica-se que apenas a primeira delas (0-5%) possui maiores valores de resistência à compressão, as demais são inferiores, mas com a ressalva de que a faixa de 10 a 20% apresenta redução máxima relativa ao REF de 4,65% (2,21MPa) para o T81/20.

A NBR 12655/2015 regulamenta que, quando não se conhece o valor do desvio padrão da resistência de dosagem, deve-se adotá-lo em função da condição de preparo do concreto, sendo no máximo 7,0 MPa. Para concretos com desvio padrão conhecido, em condições controladas de preparo, o valor a ser adotado é de no mínimo 2,0 MPa. Neste sentido, por conseguinte, verifica-se que os concretos produzidos possuem valores de DP inferiores a 4,0 MPa (enquadramento da condição A dessa norma - às classes C10 até C80) em suas respectivas médias, variando de 0,33 a 2,02 MPa.

Portanto, diante destas condições e análises, justifica-se que o teor mais viável de RPP a ser incorporado no concreto é de 15%. Tal escolha segue das seguintes justificativas:

- Possui melhor trabalhabilidade dentre os traços produzidos com substituição parcial simultânea dos resíduos, fato que justifica o seu emprego também quanto ao ensaio de absorção total. Pois, embora os concretos com teores de 20-30% apresentem melhores valores em relação a essa propriedade no estado endurecido, praticamente não apresentam abatimento no estado fresco. E, em relação aos teores de 0 a 10%, o T81/15 obteve menor valores de absorção, 4,00%.

- Possui o segundo menor valor de porosidade, sendo apenas superior ao T81/30, entretanto, tal diferença entre as médias de suas amostras são estatisticamente iguais com 95% de confiança pelo teste de Duncan.
- Com relação à resistência à compressão está compreendida na segunda faixa de maior valor desta propriedade (10-20%) com valor de 46,38 MPa. Por mais que os teores de 0 a 5% de RPP correspondam à resistências mais elevadas, os valores referentes às propriedades de trabalhabilidade, absorção e porosidade, são melhores para este traço.

Além do teor substituição parcial no cimento de RPP ser superior aos traços T81/5 e T81/10.

4 CONCLUSÕES

Com base na investigação experimental utilizada, verifica-se que a utilização de resíduos cerâmicos RPP e de mineração RS, podem ser utilizados na produção de concretos sustentáveis em substituições parciais simultânea, respectivamente, do cimento e da areia. Tal constatação é relacionada à caracterização dos materiais utilizados, ao modo de produção e das propriedades aferidas nos estado fresco e endurecido nesta pesquisa em comparação aos concretos T81/0 e REF. Com efeito, as principais conclusões do uso desses resíduos na produção de concretos são:

- 1 - A caracterização da brita e da areia utilizadas apresentaram condições compatíveis com as normas brasileiras vigentes destinadas à produção de concretos, bem como propriedades físicas, mineralógicas e microestruturais semelhantes à pesquisas nacionais e internacionais.
- 2 - A granulometria do RS possui módulo de finura similar a uma areia fina e, conseqüentemente, potencial de mistura com a areia utilizada para fins de ajustes de tamanhos das partículas na melhoria da granulometria e do empacotamento.
- 3 - O RPP foi beneficiado de forma compatível com o aglomerante de substituição, e obtendo menor granulometria. A presença de minerais de quartzo na composição mineralógica e química de ambos os resíduos utilizado na mistura do concreto são relevantes para o melhoramento químico devido ao efeito pozolânico e formação de C-S-H em maiores idades.
- 4 - A presença de calcita (CaCO_3) no RS infere na disponibilidade de cálcio que pode contribuir para a durabilidade dos concretos produzidos.

5 - Os índices de atividade pozolânica foram melhores verificados potencialmente para o RPP pelo método físico da ABNT, e que obteve condição de atividade moderada, mediante o ensaio de condutividade elétrica e comprovada pelo método do Chapelle modificado.

6 - As simulações atribuídas ao primeiro critério, através da ferramenta SOLVER do MS EXCEL pelo método minimização *GRG* sobre o erro por MMQ das misturas propostas, possibilitou encontrar uma mistura teórica e experimental entre a areia e o RS com substituição parcial de 81% e melhor aproximação da COM e erro de mínimo de 0,0049,

7 - No estado fresco, a trabalhabilidade de todos os traços produzidos com RPP e RS foram inferiores ao REF, praticamente sem abatimento para teores de RPP de 20 a 30%.

8 - No estado endurecido, os valores de absorção e porosidade de todos os traços com os resíduos foram inferiores ao REF, fato que indica o refinamento de poros dessas misturas. Porém, quanto à resistência a compressão, houve relação inversamente proporcional com o aumento do teor de RPP para um fator de correlação $R^2=0,9686$. Não obstante, a queda dessa propriedade foi de apenas 4,65% de MPa em relação ao REF.

9 - As produções dos traços através do segundo critério, na avaliação das propriedades no estado fresco da trabalhabilidade, bem como do estado endurecido em função da absorção, porosidade total e resistência à compressão por ANOVA de um fator por teste de Duncan a 95% de confiança, demonstram que o melhor teor de RPP a ser substituído parcialmente é de 15%.

Diante dessas conclusões em função da investigação experimental proposta, o traço T81/15 é o mais viável para produção de concretos sustentáveis.

5 REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 11579 (2012). Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (n° 200). Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 11582 (2016). Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 12653 (2014). Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, Brasil

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 15895 (2010) – Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle Modificado. Rio de Janeiro.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 15900 (2009) – Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 16372 (2015). Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 16605 (2017). Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 16606 (2017). Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 16607 (2017). Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 166987 (2018). Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 5739 (2018). Concreto – Ensaio de compressão de corpo-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 5738 (2016). Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 5752 (2014). Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 7211 (2009). Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 7215 (1997). Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 9779 (2009). Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR NM 248 (2003). Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR NM 45 (2006). Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR NM 52 (2009). Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR NM 53 (2003). Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR NM 67 (1998). Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, Brasil.

ALNAHHAL, M. F. et al. *Effect of aggressive chemicals on durability and microstructure properties of concrete containing crushed new concrete aggregate and non-traditional supplementary cementitious materials.* **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 482-495, 2018.

ALVES, H. J. et al. *Dependence of surface porosity on the polishing depth of porcelain stoneware tiles.* **Journal of the European Ceramic Society**, v. 31, p. 665-671, 2011.

ASTM – American Society for Testing and Materials. *ASTM C 618: Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete: Annual Book of ASTM Standards.* Philadelphia: ASTM, 1991. 3p.

AWOYERA, P. O., AKINMUSURU, J. O., NDAMBUKI, J. M. *Green concrete production with ceramic wastes and laterite.* **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 29-36, 2016.

BAGHEL, R. et al., *Utilization of mining and industrial waste: A sustainable approach.* **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 11, p. 242-246, 2015.

BARROSO, T. R. **Estudo da atividade pozolânica e da aplicação em concreto de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar com diferentes características físico-químicas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2011, 132p.

BENARCHID, Y. et al. *Application of Quebec recycling guidelines to assess the use feasibility of waste rocks as construction aggregates.* **Resources Policy**, v. 59, p. 68-76, 2018.

BEZERRA, I. M. T. et al. *Aplicação da cinza da casca de arroz em argamassas de assentamento.* **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 639-645, 2011.

BRAGA FILHO, A. C. et al. *Comportamento estrutural de vigas de concreto reforçadas com ripas de bambu cravejadas de pinos.* **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 1115-1122, 2010

BREITENBACH, S. B. **Desenvolvimento de argamassa para restauração utilizando resíduo do polimento do porcelanato.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013, 180p.

CARLOS, A. et al. *The effects of limestone aggregate on concrete properties.* **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2363-2368, 2010.

CHOI, Y. W. et al. *Utilization of tailings from tungsten mine waste as a substitution material for cement.* **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2481-2486, 2009.

DE'GENNARO, R. et al. *Structural concretes with waste-based lightweight aggregates: from landfill to engineered materials.* **Environment Science and Technology**, v. 43, p. 7123-7129, 2009.

DINIZ, H. A. A. *Influência da cura por imersão em concretos convencionais*. **Revista Tecnologia e Informação**, v. 3, p. 17-27, 2016.

ESA, M. R., HALOG, A., RIGAMONTI, L. *Strategies for minimizing construction and demolition wastes in Malaysia*. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 120, p. 219-229, 2017.

EVDOKIMOV, S. I., MASLAKOV, V. S., EVDOKIMOV, V. S. *Construction materials based on wastes from mining and metallurgical industries*. **Procedia Engineering**, v. 150, p. 1574-1581, 2016.

FONTES, C. M. A. et al. *Potentiality of sewage sludge ash as mineral additive in cement mortar and high performance concrete*. **Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures**, 2004.

FUJIWARA, T. *Effect of aggregate on drying shrinkage of concrete*. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, p. 31-44, 2008.

GALVÃO, A. C. P. **Estudo dos compósitos em purm com rejeitos do porcelanato e da scheelita para aplicações em isolantes térmicos**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2018, 90p.

GERARB, C. S. F. T. A. **Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2014, 124p.

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

JUNG, M. Y., CHOI, Y. W. *A study on the properties of concrete using tailing of tungsten ore in Sangdong área*. **Journal Korean Institute Mineration Energy Research Eng**, 1998.

LAI, Y. Y. et al. *Management and recycling of construction waste in Taiwan*. **Procedia Environmental Sciences**, v. 35, p. 723-730, 2016.

LUXÁN, M. P., 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.

MAGALHÃES, R. F., DANILEVICZ, A. M. F., SAURIN, T. A.. *Reducing construction waste: A study of urban infrastructure projects*. **Waste Management**. v. 67, p. 265-277, 2017.

MARTOS, J. L. G. et al. *Construction and demolition waste best management practice in Europe*. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 166-178, 2018.

MATOS, P. R. et al. *Rheological behavior of Portland cement pastes and self-compacting concretes containing porcelain polishing residue*. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 508-518, 2018a.

- MATOS, P. R. et al. *Use of porcelain polishing residue as a supplementary cementitious material in self-compacting concrete*. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 623-630, 2018b.
- MEDINA, C., ROJAS, M. I. S., FRÍAS, M. *Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes*. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, p. 48-54, 2012.
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. Editora Pini, 1ª ed. São Paulo, 2008.
- MENEZES, R. R., NEVES, G. A., FERREIRA, H. C. *O. Estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, p. 303-313 2002.
- PAIVA, E. H. G. **Avaliação do concreto de cimento Portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013, 105p.
- PANDA, S. K. et al. *A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material*. **Construction Building and Materials**, v. 131, p. 721-740, 2017.
- PENTEADO, C. S. G., CARVALHO, E. V., LINTZ, R. C. *Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing*. **Journal of Cleaner Production**. v. 112, p. 514-520, 2016.
- PYO, S. et al. *Effects of quartz-based mine tailings on characteristics and leaching behavior of ultra-high performance concrete*. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 110-117, 2018.
- RÊGO, J. H. S. et al. *Microstructure of cement pastes with residual rice husk ash of low amorphous silica content*. **Construction and Building Materials**, v. 80, p. 56-68, 2015.
- RODRIGUES, R., BRITO, J., SARDINHA, M. *Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge*. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 349-356, 2015.
- SEDIRA, N., GOMES, J. C., MAGRINHO, M. *Red clay brick and tungsten mining waste-based álcali-activated binder: Microstructural and mechanical properties*. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 1034-1048, 2018.
- SHARMA, A. S. et al. *Utilization of granite chips as a supplementary coarse aggregate material*. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, p. 1-4, 2016.
- SILVEIRA, D. A., FIGUEIREDO, E. P., RÊGO, J. H. S. *Influência da substituição parcial do cimento Portland pela cinza do bagaço de cana de açúcar residual nas propriedades mecânicas do concreto*. **Revista Concreto e Construções**, v. 77, p. 65-70, 2015.
- SOUSA JÚNIOR, A. M. **Efeito da adição filler a base de resíduo do polimento do porcelanato e dispersão aquosa de poliuretana na permeabilidade de pastas de cimento**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2016, 95p.

- SOUZA, F. B. et al. *Análise comparativa das propriedades de concretos convencionais com substituição parcial do cimento Portland por cinza da casca de arroz*. **Revista Iniciação Científica**, Criciúma. v. 1, 2014.
- SOUZA, J. R. *Caracterização do rejeito de scheelita das minas Brejuí e Bodó*. **20º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT)**, Joinville, 2012.
- SOUZA, J. R. **Desenvolvimento de compósitos tribologicamente eficazes**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2015, 192p.
- SOUZA, P. A. B. **Estudo do comportamento plástico, mecânica, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo do porcelanato**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2007, 232p.
- STEINER, L. R., BERNARDIN, A. M., PELISSER, F. *Effectiveness of ceramic tile polishing residues as supplementary cementitious materials for cement mortars*. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 4, p. 30-35, 2015.
- TORGAL, F. P., GOMES, J. P. C., JALALI, S. *Investigation on mix design of tungsten mine waste geopolymeric binder*. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1939-1949, 2005a.
- TORGAL, F. P., GOMES, J. P. C., JALALI, S. *Properties of tungsten mine waste geopolymeric binder*. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1201-1211, 2007c.
- TORGAL, F. P., GOMES, J. P. C., JALALI, S., 2006b. *Adhesion characterization of tungsten mine waste geopolymeric binder. Influence of OPC concrete substrate surface treatment*. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 154-161, 2006b.
- TORGAL, F. P., GOMES, J. P. C., JALALI, S., 2007d. *Investigations of tungsten mine waste geopolymeric binder: Strength and microstructure*. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 2212-2219, 2007d.
- TORKITTIKUL, P., CHAIPANICH, A. *Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes*. **Cement and Concrete Composites**. v. 32, p. 440-449, 2010.
- WANG, Y. et al. *Recycling combustion ash for sustainable cement production: A critical review with data-mining and time-series predictive models*. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 673-689, 2016.
- YUAN. H. *Key indicators for assessing the effectiveness of waste management in construction projects*. **Ecological Indicators**, v. 24, p. 476-484, 2013.
- ZHANG, W., ZAKARIA, M., HAMA, Y. *Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete*. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 500-5010, 2013.

CAPITULO 2

COMPORTAMENTO FÍSICO, MECÂNICO E DE DURABILIDADE DE CONCRETOS COM MISTURAS DE RESÍDUOS DO PORCELANATO E DA SCHEELITA

RESUMO

São gerados grandes volumes de resíduos cerâmicos e de mineração todos os anos. Com isso, são descartados milhões de toneladas de argila calcinada por Resíduo do Polimento do Porcelanato (RPP) ricos em sílica e Resíduo da Scheelita (RS) em cálcio. Na tentativa de se produzir concretos sustentáveis, diversas pesquisas têm utilizado esses resíduos de forma isolada em substituições parciais ou totais de matérias convencionais e obtido resultados consideráveis quanto às propriedades de concretos no estado fresco e endurecido. Neste sentido e na perspectiva da sustentabilidade, esta pesquisa avalia as propriedades de concreto com substituições parciais simultâneas de 15% do RPP e 81% do RS (T81/15) em relação à massa, respectivamente, do cimento e da areia. Para tanto, foram realizados ensaios físicos de porosidade total, absorção total e por capilaridade; ensaios mecânicos de ultrassom, de resistências à compressão e tração, de durabilidade por resistência penetração de íons cloreto e de alcalinidade da solução do poros do concreto. Também tiveram análises de DRX, FRX, MEV com EDS nas idades de 7, 28 e 90 dias, bem como de TG/DTG aos 212 dias. Os resultados demonstram que os resíduos influenciaram positivamente nos desempenhos físicos e de durabilidade para a mistura proposta e que, os ensaios de resistência não foram afetados em relação ao concreto de referência (REF). Essas propriedades foram associadas e corroboradas com os ensaios de DRX, FRX e MEV/EDS, através da formação de uma rede densificada de C-S-H por relação Ca/Si e cristalina, densa e compacta de portlandita. A atividade pozolânica do T81/15 também pôde ser associada à TG/DTG por meio do possível consumo de portlandita em picos exotérmicos entre temperaturas aproximadas de 380 e 480 °C relacionada ao uso do RPP. A mistura da areia com RS promoveu maior tortuosidade e compacidade à mistura.

Palavras-chave: Conectividade de poros. Efeito *filler*. Rigidez à deformações. Resistência à cloreto. Microestrutura densificada.

1 INTRODUÇÃO

É fato corroborado que estruturas implementadas por materiais cimentícios são amplamente difundidas nas mais diversas técnicas construtivas já desenvolvidas. Dentre essas estruturas; pastas de cimento, argamassas e concretos são exemplos de artigos da construção civil, que viabilizam edificações em concepções convencionais e específicas de projetos quanto as suas propriedades físicas e mecânicas. Ademais, podem ser expostas em localidades de fraca a severa agressividade ambiental, que condicionam aspectos de vida útil refletindo em parâmetros de durabilidade.

Nesta perspectiva, tecnologias que garantam qualidade e durabilidade são indispensáveis, pois as exigências de projetos são crescentes. Aliado a isso, a grande demanda da produção de concretos através do exploração e uso de seus materiais convencionais, tem gerados discussões ambientais em todo mundo, com objetivo de minimizar impactos ambientais provocados. Com efeito, estudos de materiais alternativos para sua composição têm se tornado imperativos.

Van Damme (2018) evidencia o uso em grande escala do concreto, mas ressalta que existem desafios consequentes, por exemplo, em impactos ambientais e condições socioeconômicas. Desta forma, sua pesquisa sugere mudanças nas tecnologias de fabricação aplicadas quanto aos reforços, material ligante e métodos de implementação em estruturas de concreto otimizadas. Em concordância, Schutter et al. (2018) aborda argumentações referentes ao uso da impressão 3D com concreto, explorando aspectos técnicos, econômicos e ambientais; no sentido da hibridização funcional, utilizada como estratégia de projeto, tendo vista prévia da complexidade da forma da estrutura.

Ao que tange o uso de resíduos sólidos, existem grandes aplicabilidades, devido ao crescimento econômico no seu gerenciamento e estudos realizados. Tam, Soomro e Evangelista (2018) explanam sobre a produção e utilização de agregados reciclados em concretos e outras obras civis, na demonstração da viabilidade mediante padronizações desses materiais utilizados mundialmente, bem como na economia em emissões de dióxidos de carbono CO₂ numa relação indireta benéfica. Pois a indústria do cimento é responsável por 5% das emissões desse gás, e deverá aumentar 2,5 vezes nos próximos 40 anos (DAMINELI et al., 2010).

Estudos neste sentido são relevantes, resíduos cerâmicos são utilizados para substituição do cimento e obter propriedades ao menos compatíveis: (TORRAL e JALALI, 2010; CHENG, 2016; WONG et al., 2018). Esta problemática também é extrapolada à outros materiais, pois nos últimos 15 anos, o consumo global de agregados naturais na produção de argamassas e concretos é bastante alto, e países em desenvolvimento têm tido dificuldades no fornecimento de areia natural quanto às suas demandas (RASHAD, 2016).

Chaipanich e Torkittikul (2010) estudaram os efeitos da substituição suplementar de resíduos cerâmicos como material fino e constataram que a trabalhabilidade foi reduzida com a incorporação, porém, a resistência à compressão foi ampliada para teores de até 50%.

Aliabdo et al. (2014) constatou com base em evidências experimentais que, o uso de resíduos cerâmicos como agregado ou materiais finos de argila, quando se deseja parâmetros voltados para resistência térmica, custo e impacto ambiental são satisfatórios. A Resistência térmica também foi verificada através da substituição de resíduo de aparelhos sanitários de

cerâmica por (HALICKA, OGRODNIK e ZEGARDLO, 2013), pesquisa a qual obteve bons resultados de resistência à abrasão, compressão e à tração.

Suzuki, Meddah e Sato (2009) avaliaram as propriedades físicas e mecânicas de concretos de alto desempenho com o uso de agregados graúdos de cerâmica porosa reciclada em cura úmida interna, com isto, foi constatado a redução de retração do concreto para baixa relação água/cimento e aumento da resistência à compressão.

Higashiyama et al. (2012) estudaram a durabilidade de argamassas com uso de resíduo cerâmico de diferentes tamanhos por penetração de íons cloreto (Cl^-). Obtiveram-se que os resíduos como substituição de material fino, foram mais eficazes em relação à mistura convencional, de modo que a profundidade de penetração de Cl^- em função do aumento do teor substituído ou com a diminuição de sua dimensão, resultou em menores coeficientes de difusão. Com o aumento de resíduo cerâmico de 25 e 50% na composição do concreto na substituição de agregados, houve diminuição da resistência à penetração de íons cloreto em relação ao agregado natural (ADAMSON, RAZMJOO e POURSAEE, 2015).

Segundo relatório da EUROSTAT, resíduos de mineração e de pedreiras geram cerca de 55% do total de resíduos industriais. Em específico, Portugal possui 20% de geração desses mesmos resíduos, que gera quase 100 toneladas de resíduos da rocha por dia, na Panasqueira, uma das maiores minas de tungstênio do mundo (GOMES et al., 2012).

Diante desta disponibilidade de resíduos de minas de tungstênio, pesquisas foram desenvolvidas para utilização em materiais cimentícios, por exemplo: (TOGAL, GOMES e JALALI, 2008; TORRALBA e JALALI, 2010; SILVA, GOMES e ALBUQUERQUE, 2012). Esses estudos aferiram a aplicação como aglutinante geopolimérico com alta resistência nas primeiras idades e estrutura compactada.

Em virtude desta explanação, esta pesquisa proporciona um estudo experimental a fim de aferir as propriedades físicas, mecânicas de durabilidade de concretos sustentáveis, com teores de 15% do Resíduo do Polimento do Porcelanato (RPP) em relação à massa do cimento e 81% do Resíduo da Scheelita (RS) sobre a massa do agregado miúdo, em comparação ao concreto convencional. Para tanto, também foram estudados aspectos mineralógicos, químicos, microestruturais e termogravimétricos, com o objetivo de se obter interpretações correlacionantes com as propriedades obtidas dos concretos produzidos.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para produção dos concretos desta pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais: areia quartzosa com módulo de finura de 2,78, diâmetro máximo característico de 4,75 mm,

massa específica real de 2,64 g/cm³ e massa unitária de 1,68 g/cm³; agregado graúdo granítico do tipo brita 01 com módulo de finura de 6,95, diâmetro máximo característico de 19 mm, massa específica real de 2,69 g/cm³, massa unitária de 1,91 g/cm³ e taxa de absorção de água de 0,4%; cimento Portland de alta resistência inicial e resistente à sulfatos (CP V ARI RS) com diâmetro médio das partículas de 9,60 µm, massa unitária 1,00 g/cm³, diâmetro médio de 9,60 µm e finura Blaine de 4442 cm²/g; aditivo superplastificante e água de amassamento proveniente de poço profundo de pH e condutividade elétrica de igual a 8,51 e 71 µS/cm a 26,4 °C, com teor de cloreto de 146 mg de cloreto mg/l. Tais materiais descritos foram usados na mistura do concreto de padrão de Referência (REF).

Com relação ao concreto produzido com misturas dos resíduos RPP e RS caracterizados na Tabela 1, foram os mesmos materiais caracterizados no concreto REF, mas com teores de substituição simultânea em massa do cimento e da areia. Para tanto, os teores foram respectivamente de 15% e 81%. A Tabela 2 ilustra a composição dos traços produzidos.

Tabela 1: Características dos resíduos.

Características	RPP	RS
Módulo de finura	-	1,87
Massa específica real (g/cm ³)	2,47	2,80
Massa específica unitária (g/cm ³)	0,63	1,59
Dimensão máxima (mm)	-	1,18
Diâmetro médio (µm)	7,20	-
Finura Blaine (cm ² /g)	10765	-
Composição mineralógica	Quartzo, Mulita e Carbetto de silício	Calcita, Quartzo e Berlinita
Composição química	Si, Al, Mg, K, Ca	Ca, Si, Al, Fe, Mg
Perda ao fogo (%)	3,33	14,24
Concentração de cloreto (mol/l)	0,004	Ausente

Fonte: Autor (2019).

Tabela 2: Consumo de materiais em (kg/m³).

Traço ⁽¹⁾	Materiais						RPP	RS
	Cimento	Areia	Brita	Água	Aditivo (%)			
REF	461,61	760,01	1013,34	184,24	0,5	0,00	0,00	
T81/15	392,37	144,40	1013,34	184,24	0,5	69,24	615,61	

⁽¹⁾ Os traço da misturas indicam: T – Traço; (%RS)/(%RPP) – Porcentagem do resíduo da scheelita seguida da porcentagem do pó do porcelanato.

Fonte: Autor (2019).

2.1 Modo de produção e cura

Com relação ao preparo, foi utilizado o método convencional em betoneira mecânica de 120 litros com a seguinte sequência de mistura: brita, metade da água de amassamento, metade do cimento, areia e metade do cimento. Vale ressaltar que a outra metade da água de

amassamento foi utilizada gradativamente ao longo da mistura, a partir da aplicação da primeira metade do cimento, junto à diluição do aditivo superplastificante.

Para o traço em que houve substituição parcial dos resíduos, foram misturados previamente, o RPP com o cimento e RS com a areia em um recipiente metálico com volume compatível e com auxílio de colher de pedreiro. O método de cura aplicado foi o de submersão em tanque com água adicionada de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 . Os corpos de prova moldados (NBR 5738/2016) ficaram em repouso por 24 horas e, após este período, foram desmoldados e submetidos ao processo de cura citado até a data de realização dos ensaios do concreto do estado endurecido. Para este estudo, foram produzidos corpos de prova em triplicatas de dimensões 10x20 cm para o desenvolvimento dos ensaios no estado endurecido de cada traço.

2.2 Ensaios no estado fresco e endurecido

Os concretos produzidos foram submetidos aos ensaios de consistência *Slump test* (NBR NM 67/1998) e massa específica no estado fresco (NBR 9833/2009). No estado endurecido, a Tabela 3 ilustra a classificação dos ensaios realizados em físicos, mecânicos, durabilidade e análises: mineralógica, química, microestrutural e termogravimétrica. Para ambos os traços, os ensaios foram realizados na idades dos concretos de 7, 28 e 90 dias, exceto para TG/DTG a qual ocorreu aos 212 dias.

Tabela 3: Ensaios no estado endurecido.

Propriedades	Ensaios	Equivalência
Física	Absorção e porosidade (NBR 9778/2009)	ASTM C 29:2017
	Absorção por capilaridade (NBR 9779/2012)	ASTM C 1585:2013
Mecânica	Ultrassom (NBR 8802/2019)	ASTM C 597:2016
	Resistência à compressão (NBR 5739/2007)	ASTM C 39:2018
	Resistência à compressão diametral (NBR 7222/2011)	ASTM C 496:2017
Durabilidade	Alcalinidade	
	Profundidade de íons cloreto	
	Concentração de íons cloreto	
Análises mineralógica, química, microestrutural e termogravimétrica	DRX, FRX, MEV, TG/DTG ⁽¹⁾	

⁽¹⁾ DRX – Difractometria de Raios X; FRX – Fluorescência de Raios X; MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura; TG/DTG – Termogravimétrica, Diferencial Termogravimétrica.

Fonte: Autor (2019).

2.2.1 Propriedades físicas

Através desses ensaios foi possível obter correlações com as propriedades mecânicas e de durabilidade, tendo em vista a obtenção de taxas absorção de água em dois métodos de medição, por totalidade do corpo de prova e ascensão capilar a partir sua base. Também foram verificados valores de porosidade total, que refletem a interação resultante da misturas de seus materiais constituintes, sobretudo, dos resíduos utilizados. Os ensaios foram realizados conforme preconizam as regulamentações normativas vigentes da Associação Brasileira de Norma Técnicas (ABNT).

2.2.2 Propriedades mecânicas

Com a realização dos ensaios mecânicos, foi possível obter resultados referentes à resistência dos concretos produzidos, a fim de garantir sua aplicabilidade, mediante critérios da NBR 6118/2014. A aferição de sua qualidade e medição indireta do módulo de elasticidade dinâmico (Equação 1) foi através da obtenção da velocidade do pulso ultrassônico (QASRAWI, 2000; ASTM C 597:2016). Os ensaios foram realizados conforme preconizam as regulamentações normativas vigentes da ABNT.

$$E_d = \rho(1+\nu)(1-2\nu)V^2/(1-\nu) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

E_d : Módulo de elasticidade dinâmico (GPa);

ρ : Massa específica do concreto (Kg/m^3);

V: Velocidade do pulso ultrassônico (km/s);

ν : Coeficiente de Poisson ($\nu=0,20$).

2.2.3 Propriedades de durabilidade

Foram realizados ensaios para verificar a durabilidade dos concretos quanto a penetração de íons cloreto, de modo que o ingresso desse agente agressivo é um dos principais causadores deletérios da indução quanto a diminuição da alcalinidade do concreto e, conseqüentemente, da corrosão das armaduras (ANN e SONG, 2007; FIGUEIREDO e MEIRA, 2013; ROMANO, BRITO e RODRIGUES, 2013; MEIRA et al., 2014; RIBEIRO et al., 2014).

Para tanto, os concretos produzidos foram submetidos a duas formas de cura por imersão: uma em tanque com água adicionada de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e outra em tanque contendo solução saturada de Ca(OH)_2 com 15% de cloreto de sódio (NaCl). Sendo neste último, para utilização como câmara acelerada de penetração de íons cloreto a partir das primeiras idades, ambos permaneceram imersos por 90 dias. Com isso, a penetração de Cl^- ocorreu em todas as direções das amostras.

Outras amostras de concretos após cura úmida aos 28 dias, tiveram a área lateral impermeabilizada com tinta, submetidas à câmara salina com ciclos sazonais de imersão e secagem também durante 90 dias. Neste caso, a penetração de Cl^- ocorreu apenas no topo e na base dos corpos de prova. Para tanto, o ciclo de imersão foi de duração de 5 dias e o de secagem de 2 dias.

A solução para câmara acelerada foi utilizada segundo procedimento estabelecido pela norma portuguesa LNEC E390 (COUTINHO, 2005; MELO, 2013). Desta forma, ambos os concretos, REF e T81/15, imersos nos dois tanques, foram aplicados aos ensaios de alcalinidade por medição de pH, profundidade e concentração de íons cloreto nas idades de 7, 28 e 90 dias. Os concretos referentes ao processo de imersão e secagem, também foram submetidos ao ensaio de concentração de íons cloreto com o mesmo período de exposição anterior.

Para a medição direta do pH, em cada idade, foram extraídas de 0,8 gramas de pó e colocadas para agitar (agitador mecânico) em 25 ml de água destilada em erlenmeyers durante 48 horas, para ambos os traços produzidos. Após esse procedimento, foram verificadas as leituras de pH através com o uso de um pHmetro do tipo TEC-3MP.

Quanto ao ensaio de profundidade de íons cloreto, foi utilizado o método colorimétrico, a partir da aspersão de solução de 0,1 M de nitrato de prata AgNO_3 na superfície interna do concreto. Pois, esse método é aplicado para determinação da frente (Cl^-) que penetram no concreto por meio de absorção aliada à difusão e, ao ser aplicada na matriz cimentícia, causa uma reação fotoquímica. Tal reação poderá indicar os seguintes resultados: presença de íons cloreto livres na formação de um precipitado branco de cloreto de prata, ausência ou íons cloreto combinados em cor marrom (KIM et al., 2013; REAL et al., 2015).

Para isto, foram retirados corpos de prova de ambos os tanques de cura, rompidos diametralmente e colocados para secar em estufa a 105°C por 24 horas antes da realização do ensaio por aspersão. Posteriormente, foi realizada a aspersão nas superfícies dos concretos e, após 15 minutos, com o auxílio de um paquímetro digital INSIZE, foram aferidas 36 leituras em cada traço por idade.

O ensaio de concentração de íons cloreto foi desenvolvido após a extração de amostras de 0,8 gramas de pó da argamassa do concreto em profundidades de 2 a 10 cm, com incrementos a cada 2 cm. Desta forma, totalizando 5 amostras para cada traço produzido e para cada tanque de imersão, ou seja, 20 amostras por idade dos concretos. Foram realizadas duplicatas de cada profundidade.

Tais amostras foram diluídas em 25 ml de água destilada em agitação mecânica durante 48 horas. Realizado esse procedimento, foram retiradas alíquotas de 10 ml de solução de pó da argamassa do concreto diluído e submetido ao processo de titulação por AgNO_3 de 0,1 M por indicador de cromato de potássio K_2CrO_4 a 5%. Durante a titulação, ao atingir a cor vermelho “telha”, anotou-se os valores de consumo de nitrato de prata e calculou-se a porcentagem de cloreto em massa de concreto, conforme a Equação 2. Este procedimento é denominado de método de Mohr (BERENGUER et al., 2018).

$$T_{cl} = [0,00025(V_2 - V_1)M_{Cl}/m]100 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

T_{cl} : Teor de cloreto em relação à massa de concreto %(g/g);

V_1 : Volume da solução de AgNO_3 gasto para titular a branco (ml);

V_2 : Volume da solução de AgNO_3 gasto para titular o amostra (ml);

M_{Cl} : Massa molar de Cl (g/mol);

m: Massa de concreto (g).

2.2.4 Análises mineralógica, química, microestrutural e termogravimétrica

Para a identificação da composição mineralógica e química foram utilizados os equipamentos, respectivamente, XRD-6000 e EDX-7000 ambos da SHIMADZU. As amostras utilizadas foram obtidas da extração de 10 gramas de pó dos concretos REF e T81/15, passadas na peneira #200 (0,075 mm) nas idades de 7, 28 e 90 dias. As análises em FRX foram realizadas a vácuo e de DRX a partir de varreduras com goniômetro de ângulo 2θ à razão de 2° por minuto com intervalo de medida na faixa de 10 a 80° .

Nas análises microscópicas em MEV, o equipamento utilizado foi SSX-550 SUPERSCAN com EDS acoplado. As amostras foram obtidas através do corte por lâmina diamantada em geometria diametral da porção central dos corpos de provas dos concretos produzidos, em dimensões de 10x3 cm. Logo após, foram cortadas em barras com dimensões

de 8x3x3 cm e aplicadas em processo de criogenia por 2 minutos em nitrogênio líquido, com o objetivo de alívio das tensões para posterior obtenção das amostras para o ensaio.

Com o auxílio de uma talhadeira, as barras foram reduzidas a cubos com dimensões de 3x3x3 cm, secados em estufa a 105 °C por 24 horas, metalizados com ouro em procedimento a vácuo na melhoria do contraste das imagens a serem obtidas e, por fim, submetidos ao ensaio de microscopia nas idades propostas.

Para as análises de TG/DTG foi utilizado o instrumento analisador TGA-50 da SHIMADZU, os concretos das amostras foram curados aos 28 dias em água com hidróxido de cálcio e, posteriormente, passaram 184 dias em ambiente seco de laboratório. Nessa idade (212 dias) foi extraído o pó da argamassa do concreto, peneirado na abertura 0,075 mm e secado.

Durante a realização do ensaio as amostras foram secadas a 50 °C por 10 minutos, para que não houvessem variações de umidade. A temperatura alcançou 850 °C numa taxa de aquecimento de 10 °C/min e 100 ml/min de fluxo de N₂ usando cadinho de platina, baseado em procedimento utilizado por (JACOBY e PELISSER, 2015).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estado fresco

Os resultados do *slump test* e da massa específica dos concretos frescos estão apresentados na Tabela 4. Os valores de trabalhabilidade obtidos revelam que houve decréscimo do abatimento de 14,97% do concreto T81/15 em relação ao REF.

Tabela 4: Resultados dos ensaios no estado fresco dos concretos.

Traços	Trabalhabilidade		Massa específica (kg/m ³)
	<i>Slump</i> (mm)	DC(%)(¹)	
REF	147	-	2.486
T81/15	125	- 14,97	2.534

(¹) Desvio para Controle em relação ao REF.

Fonte: Autor (2019).

Tal comportamento pode ser evidenciado pela finura e porosidade do RPP e dimensão do RS, que possuem menor granulometria, respectivamente, que o cimento e a areia substituídos, fator que contribui para o aumento do consumo de água. A trabalhabilidade do concreto depende da quantidade e das propriedades dos materiais finos presentes

(SIDDIQUE, 2013) e o aumento de material fino aumenta a demanda de água e reduz a trabalhabilidade do concreto (PENTEADO, CARVALHO e LINTZ, 2016; WANG et al. 2016).

Segundo Bartos (1992), esses concretos possuem abatimentos que classificam sua trabalhabilidade como alta, pois está compreendida entre 80-155 mm. De acordo com a NBR 8953/2015, tais concretos são classificados como S100, os quais possuem aplicações típicas em elementos estruturais com lançamento convencional. Na classificação europeia da norma BS EN-206-1/2000, a trabalhabilidade é enquadrada como S3 (100-150 mm).

Awoyera et al. (2016) utilizaram resíduos cerâmicos em substituição do agregado miúdo e graúdo e verificaram decréscimos mais acentuados em relação ao concreto convencional, em substituições de 100% de agregados miúdo e graúdo e de 75% para agregado graúdo.

Medina, Rojas e Frías (2012a) constaram que substituições de resíduos cerâmicos de 15% a 25% por agregado graúdo afetaram a trabalhabilidade e massa específica no estado fresco numa redução linear, sendo a redução de consistência cerca de 5,3%.

Com relação à massa específica no estado fresco, verifica-se da Tabela 4 que o T81/15 foi maior que o REF, este acréscimo pode ser atribuído à massa específica do RS em porcentagem superior na mistura.

Penteado, Carvalho e Lintz (2016) obtiveram menores valores de abatimento de todos os concretos com substituições de RPP por cimento de 5 a 30%, sendo a redução de 33,33% para substituição de 15% de RPP.

A diminuição da trabalhabilidade de concretos com substituição parcial de RS pode ser verificada em Pyo et al. (2018), devido a formação de estruturas interligadas em forma de placas do resíduo, bem como a fluidez de argamassas (CHOI et al., 2009) e a variação desta propriedade aferida por Paiva (2013). Estudos que demonstram a variação desta propriedade com a utilização do RS em materiais cimentícios.

3.2 Estado endurecido

3.2.1 Propriedades físicas

Resultados de absorção e porosidade totais de concretos no estado endurecido possuem alta relevância quanto a durabilidade, pois podem influenciar na sua manutenção e desempenho ao longo do tempo (ISMAIL e JAEEL, 2014). Com efeito, existe uma relação

com a resistência de concretos, de modo que suas taxas podem ser reduzidas com o aumento da resistência.

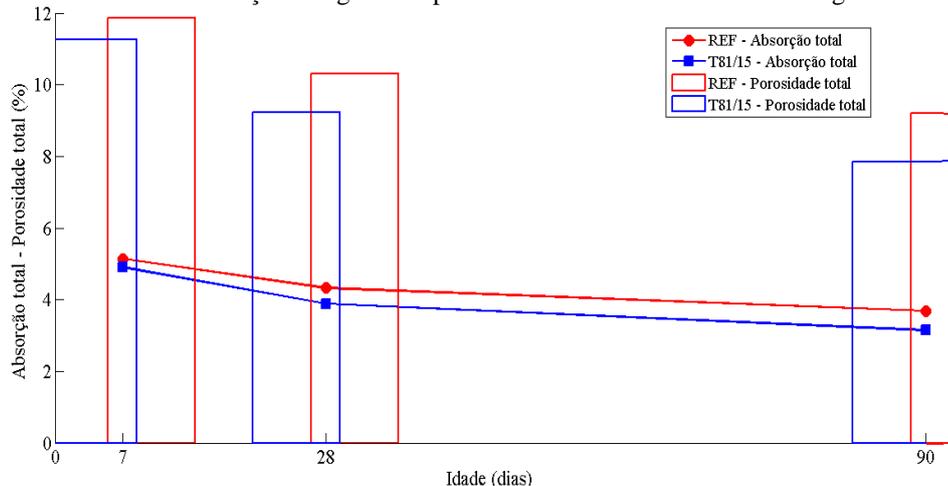
Mondani e Vyawahare (2013) verificaram que o aumento de substituição parcial de resíduos de cinza do bagaço de cana-de-açúcar elevou o coeficiente de sorvatividade, em decorrência do aumento da absorção de água. Esse coeficiente é oriundo da entrada de água nos poros sob condições insaturadas, devido a sucção capilar, ou seja, o fluxo insaturado de fluidos no concreto (SENTHAMARAI, MANOHARAN e GOBINATH, 2011).

Penteado, Carvalho e Lintz (2016) obtiveram aumentos nas taxas de absorção e porosidade de concretos com substituição parcial de RPP pelo cimento, resultados os quais justificaram menores valores de resistência à compressão.

Torgal, Gomes e Jalali (2008b) utilizaram resíduo de mina de tungstênio e constataram que, os dados de absorção de água revelaram estrutura bastante compacta e demonstraram boa estimativa de porosidade devido o empacotamento das misturas.

Os valores de absorção e porosidade total dos concretos produzidos estão apresentados na ilustração da Figura 1.

Figura 1: Valores médios da absorção de água e da porosidade total dos concretos ao longo das idades.



Fonte: Autor (2019).

Da análise da Figura 1, constata-se que os resultados de absorção de água e porosidade foram melhores para o concreto T81/15 em relação ao concreto de controle (REF) em todas as idades. Vale ressaltar que, tal diferença foi sendo levemente distanciada a partir dos 28 dias, pois elas remetem em 0,44 e 0,54% aos 90 dias para a propriedade de absorção, sendo essa última superior o dobro em relação à diferença dos 7 dias, 0,24%.

Quanto aos valores de porosidade, pode-se verificar comportamento similar, pois a diferença dos concretos aos 90 dias foi 2,28% em relação aos 7 dias. É importante mencionar que aos 28 dias as porosidades do REF e do T81/15 foram de 10,30 e 9,23%, respectivamente.

Fato que demonstra a pequena influencia desta propriedade proveniente das substituições parciais dos resíduos, bem como na absorção, conforme as variações discutidas anteriormente. Gencil et al. (2012) explana que, a absorção de água do concreto relaciona-se com a estrutura de poros no estado endurecido, e a maioria dos concretos de qualidade possuem taxas de absorção inferiores à 10%.

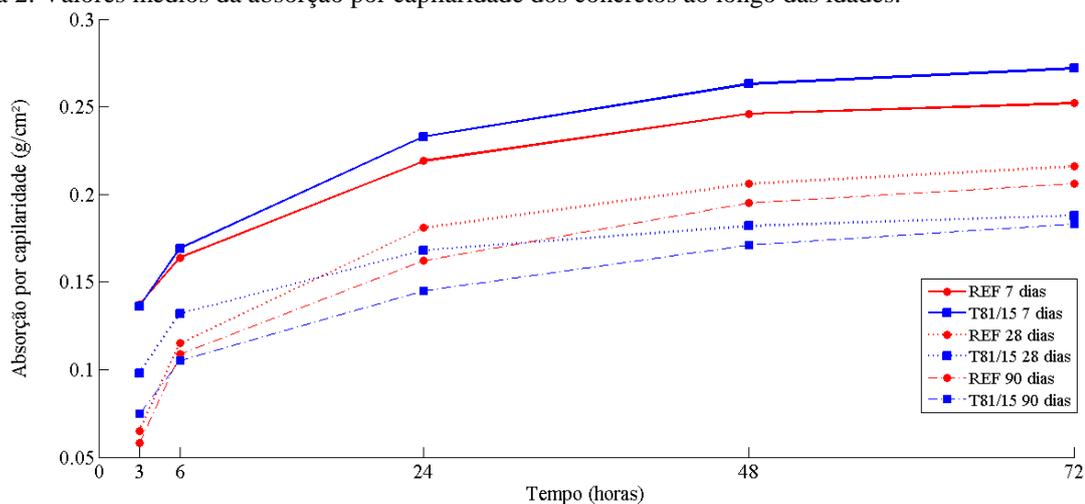
Em estruturas de concreto, a mistura dos agregados, a pasta de cimento e a zona transição permitem verificar o comportamento mecânico bem como sua permeabilidade e durabilidade. De modo em geral, a porosidade somente não traduz o estabelecimento da permeabilidade, mas sim um sistema de poros abertos (CHIA e ZHANG, 2002).

A absorção por capilaridade pode ser relacionada com porosidade, em que a conectividade da rede de poros é indiretamente avaliada nessa relação (PYO et al., 2018).

Na Figura 2 estão apresentados os resultados referentes à absorção por capilaridade dos concretos produzidos nas idades de 7, 28 e 90 dias. Da análise das curvas obtidas em função das horas de exposição de água a partir da base dos corpos de prova, constata-se que aos 7 dias, o concreto de referência obteve menor valor de absorção em relação ao T81/15, principalmente após às 24 horas de ensaio. Aos 28 dias, tal comportamento foi invertido, pois o traço com substituições dos resíduos obtiveram menor absorção capilar a partir das 24 horas.

Nas últimas medições, aos 90 dias, verificou-se que conforme ocorreu aos 28 dias, o concreto T81/15 apresentou menores valores de absorção ao longo do tempo, entretanto, o menor valor de absorção foi registrado a partir das 6 horas de ensaio.

Figura 2: Valores médios da absorção por capilaridade dos concretos ao longo das idades.



Fonte: Autor (2019).

Diante da discursão anterior, verifica-se que as substituições parciais dos resíduos influenciaram na absorção por capilaridade em idades posteriores aos 7 dias dos concretos no

estado endurecido, imprimindo valores de absorção por capilaridade inferiores ao REF, possivelmente evidenciado pelo efeito *filler* do RPP e compacidade da mistura otimizada entre a areia e RS. Esse resultado pode ser justificado em comparativo ao ensaio de absorção e porosidade total, pois o traço T81/15, também apresentou menores valores dessa propriedades, fato que sugere a conectividade de poros superior do REF.

3.2.2 Propriedades mecânicas

A Tabela 5 resume os resultados referentes aos ensaios mecânicos realizados nos concretos REF e T81/15. A partir dela verifica-se que, embora os valores obtidos de massa específica do concreto REF tenham sido superiores ao T81/15, não há diferenças de contraste no decorrer das idades analisadas, fato que permite evidenciar a não influência dos resíduos na mistura do concreto nesta propriedade.

Este comportamento foi aferido também no estado fresco, por mais que a ordem de grandeza tenha sido invertida entre os concreto, os valores desta propriedade foram similares. Em comparação ao estado fresco, esta diferença foi minimizada no estado endurecido, pois a maior diferença foi registrada aos 7 dias com redução de 0,48%, enquanto que a medição desta propriedade medida na consistência teve aumento de valor igual a 1,89% referente ao REF.

Os concretos obtiveram massas específicas referentes à concretos estruturais em conformidade com NBR 6118/2014, que classificam numa faixa de 2000 a 2800 kg/m³, considerado como concreto normal de acordo com a NBR 8953/2015 e 9778/2009, sendo esta equivalente à *ASTM C 231:2017* e *ASTM C 29:2017*.

Tabela 5: Valores médios dos ensaios mecânicos dos concretos e massas específicas ao longo das idades.

Propriedades	Traços	Idades (Dias)		
		7	28	90
Massa específica (kg/m ³)	REF	2311	2380	2503
	T81/15	2300	2375	2495
Velocidade do pulso ultrassônico (km/s)	REF	4,668	4,828	4,976
	T81/15	4,757	4,831	4,918
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	REF	45,33	49,92	55,79
	T81/15	46,85	49,89	54,31
Resistência à compressão (MPa)	REF	43,41	50,12	60,45
	T81/15	40,78	48,71	58,72
Resistência à compressão diametral (MPa)	REF	3,49	3,59	3,64
	T81/15	2,96	3,20	3,33

Fonte: Autor (2019).

Os valores de massa específica justificam os resultados obtido do ensaio de velocidade do pulso ultrassônico, tendo em vista que há uma relação diretamente proporcional entre ambos, exceto, para a idade de 28 dias em que o traço T81/15 foi ligeiramente superior ao REF.

Diante das velocidades medidas, infere-se que todos os concretos podem ser classificados em excelente qualidade, segundo relação sugerida em pesquisa de Whitehurst (1951).

Breysse (2012) menciona que, nas primeiras idades do concreto, podem causar influencias nas variações da aferição do pulso ultrassônico devido ao ganho de resistência, mas que ela é estabilizada em maiores idades. A estabilização das medições foi evidenciada nas pequenas variações de velocidade, que pode ser justificado devido ao uso do cimento de alta resistência inicial.

Mesmo que hajam pequenas variações na porosidade dos concretos e na velocidade ultrassônica entre eles, há correlação entre essas propriedades, de modo que elas são inversamente proporcionais. Ao longo das idades, verifica-se esta relação. Benouis e Grini (2011) estudaram essa relação para concretos de diferentes relações água/cimento, bem como Lafhaj et al. (2006) em argamassa incluindo também a permeabilidade, Hernández et al. (2000).

A partir dos resultados do ensaio de ultrassom foi possível estimar o módulo de elasticidade dinâmico dos concretos. Qasrawi (2000) demonstrou a relação da resistência dos concretos com o módulo de elasticidade dinâmico, Barluenga e Hernández-Olivares (2010) utilizaram uma relação entre a massa específica e a velocidade do ultrassônica para estimar o módulo de elasticidade dinâmico em argamassas.

Das estimativas do módulo de elasticidade dinâmico, verifica-se que apenas aos 7 dias o concreto T81/15 apresentou maior valor, isso pode ser inferido à velocidade do pulso ultrassônico superior para este traço.

Não obstante, dessa estimativa pode relatar que os concretos possuem praticamente o mesmo nível de rigidez, de conseqüente resistência à deformação caso sejam submetidos à maiores tensões (SIDDIQUE, 2003).

A pequena diminuição dessa propriedade pode ser atribuída ao consumo de água provocado pelos resíduos na influência da relação água/cimento (ALVES et al., 2014; GUPTA, CHADHARY e SHARMA, 2014), refletido no menor abatimento registrado T81/15.

A resistência à compressão do concreto T81/15 encontra-se na mesma faixa que a mistura de referência, sendo a maior diferença entre eles aos 7 dias de 2,63 MPa e maiores

resistências para o REF em todas as idades. Segundo a NBR 12655/2015 equivalente à *ASTM C 1084:2010*, de acordo com a condição de preparo e controle na produção de concretos, bem como da ausência ou do conhecimento prévio do desvio padrão da resistência de dosagem, o valor adotado pode estar entre 2,0 e 7,0 MPa. Desta forma, fazendo uma relação entre os dois traços, averigua-se que é inferior ao valor máximo a ser adotado de 4,0 MPa, referente à condição A de preparo de concretos dessa norma (classes C10 até C80).

Com relação ao ganho de resistência, observa-se que entre as idades de 7 e 28 dias, a diferença entre os incrementos foi 3,99%, maior para o T81/15. Quando se analisa entre 28 e 90 dias, essa diferença cai para 0,06%, porém, o incremento de resistência do REF foi superior ao traço com RPP e RS.

Os valores obtidos do ensaio de resistência à compressão remetem à classificação de concreto de alta resistência aos 28 dias para o REF, com redução de 1,41 MPa nesta idade para o T81/15. Isaia (2017) associa a relação água/cimento com o tipo de cimento para obtenção estimada do valor de resistência à compressão aos 28 dias em mistura convencional, ao realizar extrapolação desses dados para relação igual a 0,40 com cimento CP V ARI-RS, a resistência à compressão é cerca de 50,10 MPa, seguindo tendência linear com fator de correlação $R^2=0,9978$. Resultado o qual corrobora com os valores obtidos a partir do traço utilizado nos concretos produzidos.

A evolução da resistência à compressão diametral dos concretos ao longo das idades possui explanação equivalente aos resultados referentes à compressão, pois o uso de RPP e RS pouco afetou a resistência à tração relativa ao REF.

Medina, Frías e Rojas (2012) obtiveram comportamento mecânico similar, porém, com melhora para concretos produzidos com substituição de agregados reciclados de cerâmica. Anderson, Smith e Au (2016) também verificaram incremento de resistência à tração em concreto com agregados cerâmicos em substituição do agregado graúdo.

Guerra et al. (2007) substituíram agregado graúdo por resíduo cerâmico de louças sanitárias e avaliaram o comportamento da resistência à compressão diametral, mas não obtiveram relação conclusiva sobre as substituições e essa propriedade. Alves et al. (2014) verificaram que a resistência à tração não foi significativamente afetada com a substituição de resíduo de tijolo em relação ao concreto convencional, mas foi diminuída consideravelmente quando foram utilizados agregados de louças sanitárias.

Frotté et al. (2017) utilizaram RCD com teores de substituição parcial de 25 e 50% em relação ao agregado graúdo natural e verificaram que somente o último teor causou redução significativa na compressão diametral

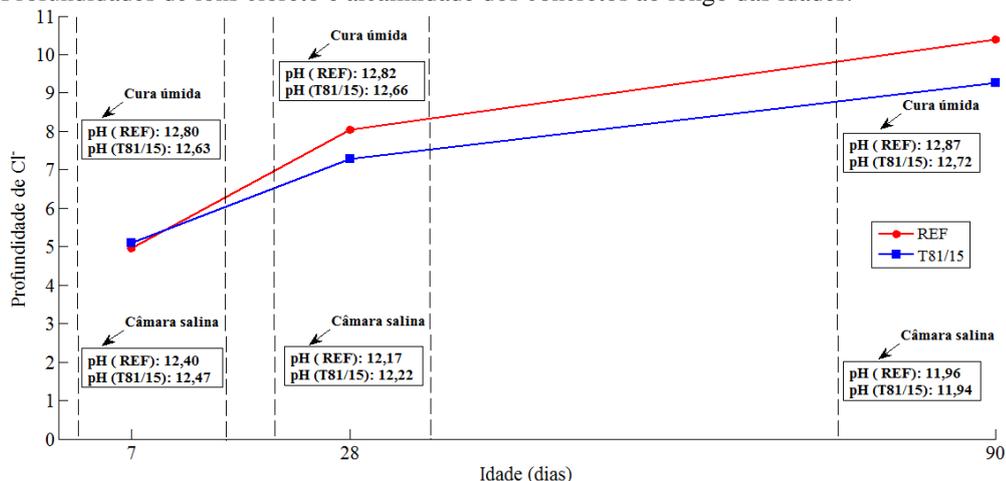
3.2.3 Propriedades de durabilidade

Foram aferidas 36 medidas de penetração de íons cloreto em cada concreto produzido em ensaio acelerado na câmara salina por idade, com isso, pôde-se verificar através dos valores médios (Figura 3) que, o concreto T81/15 apresentou menores valores de profundidade de Cl^- a partir dos 28 dias de idade de imersão nessa câmara. Tal resultado corrobora-se com a combinação das propriedades obtidas de porosidade, absorção total e por capilaridade, pois o desempenho do concreto com resíduos de RPP e RS foi superior ao REF, principalmente nas idades mencionadas anteriormente.

Ressalta-se que, os concretos imersos em cura úmida com hidróxido de cálcio, não apresentaram profundidades de íons cloreto mediante aspensão de nitrato de prata, tal ensaio não obteve sensibilidade de medida. Para concentração de cloreto por titulação com AgNO_3 nos mesmo concretos, em todas as idades, foram aferidas 0,11% g de cloreto/g de concreto.

Com relação a alcalinidade do concreto, verifica-se também na Figura 3 que os concretos imersos em cura úmida de Ca(OH)_2 apresentam aumento ao longo das idades. Esse fato relaciona-se com o processo das reações hidratação C_3S e C_2S do cimento e formação do álcalis de hidróxido de cálcio, que representa 20% da reserva alcalina do concreto, bem como hidróxidos de sódio e potássio (TUUTTI, 1982), referentes à durabilidade de concretos ao ataque de agentes nocivos, por exemplo, íons cloreto, dióxido de carbono, sulfatos, sais de amônia e magnésio.

Figura 3: Profundidades de íons cloreto e alcalinidade dos concretos ao longo das idades.



Fonte: Autor (2019).

Segundo Ahmad (2003), a solução dos poros do concreto possui alta alcalinidade, fato esse que justifica o grande grau de proteção do aço contra a corrosão em condições de pH superiores a 13,5. Meira et al. (2014) relata que a literatura indica fatores como características

de materiais, composição do cimento, relação água/cimento e cura na influência do conteúdo crítico de cloreto em dano a quantidade disponível na solução dos poros ou alteração de pH.

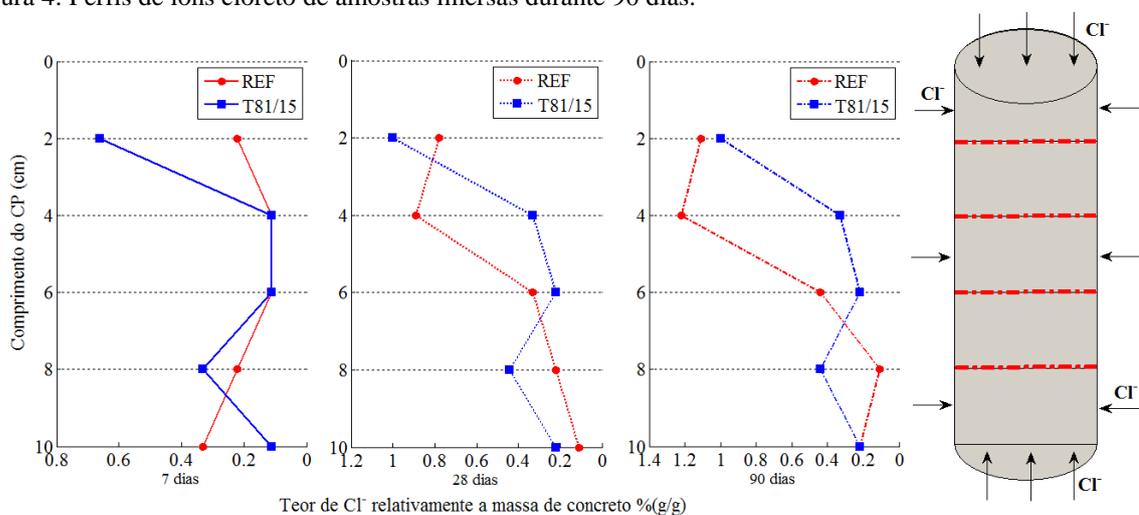
A redução do pH de ambos os concretos ao longo das idades, está associada ao ensaio acelerado em câmara salina e na possível influência do uso do RPP em substituição do cimento. Haussmann (1998), menciona que o uso de adições no cimento podem provocar a redução do pH na solução de poros do concreto, mas sem prejuízos à despassivação do aço.

É importante mencionar que além dos concretos REF e T81/15 terem sido submetidos à exposição de íons cloreto, testes químicos realizados isoladamente nos materiais de mistura identificaram presença de Cl^- na água de amassamento e no RPP, conforme mencionado. Entretanto, tal quantidade não foi suficiente para influenciar na detecção qualitativa dos concretos curados em $\text{Ca}(\text{OH})_2$ via ensaio colorimétrico de aspensão, sendo apenas aferidos por titulação através do método de Mohr com uso de nitrato de prata.

Diante dessa discussão e da análise da Figura 3, nota-se que aos 90 dias de idade na realização do ensaio, pôde-se aferir menor medição de penetração de cloreto no T81/15 e reduções do pH da solução dos poros do concreto de 12,87-11,96 e 12,72-11,94, respectivamente ao REF e o T81/15.

A Figura 4 ilustra os resultados referentes à concentração de cloreto relativa à massa de concreto. Aos 7 dias de exposição verifica-se que, nas profundidades de 4 e 6 cm dos corpos de prova, as porcentagens de íons cloreto são equivalentes de ambos concretos e, apenas em 10 cm, o traço T81/15 teve concentração de Cl^- inferior ao REF. Embora em 2 cm a diferença de concentração seja de 0,66 % (g/g) para o T81/15 e 0,22 % (g/g) para o REF, pôde-se inferir que nas demais foram obtidas pequenas diferenças de 0,11 e 0,22 % (g/g).

Figura 4: Perfis de íons cloreto de amostras imersas durante 90 dias.



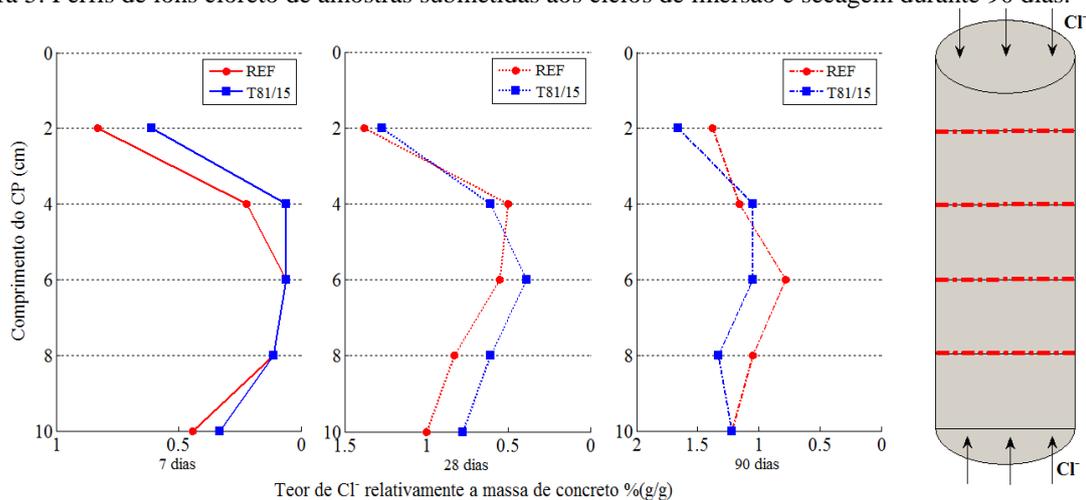
Fonte: Autor (2019).

Aos 28 dias nota-se que somente na profundidade de 4 cm há uma diferença considerável de concentração dos concretos, relativa às outras medições e, consequente aumentos das diferenças de concentrações entre os traços devido ao tempo de exposição.

Aos 90 dias de imersão, as medições Cl^- em 2-6 cm relativas ao REF continuaram crescendo comparadas as medições dos 28 dias, enquanto não houve nenhuma variação foi aferida para o T81/15. Tal fato pode ser atribuído a saturação mais rápida da solução dos poros desse concreto em relação ao concreto convencional, tendo em vista que não houveram secagens dos corpos de prova durante o tempo de exposição. Desta forma, isso não permite a continuação do processo de difusão Cl^- para estrutura de poros. Além disso, de forma indireta, indica menor porosidade do T81/15, bem como menores índices absorção e conectividade poros ao longo da idades, devido a menor velocidade de progressão de cloreto.

Com relação aos concretos curados aos 28 dias e submetidos aos ciclos de imersão e secagem na câmara salina, os resultados estão ilustrados na Figura 5.

Figura 5: Perfis de íons cloreto de amostras submetidas aos ciclos de imersão e secagem durante 90 dias.



Fonte: Autor (2019).

Da Figura 5, verifica-se que o concreto T81/15 obteve equivalente ou maior resistência à penetração de íons cloreto nas idades de 7 e 28 dias nas medições de 6-10 cm do topo dos corpos de prova. Aos 90 dias, apenas a medição de 4 cm teve concentração de Cl^- inferior ao REF. Entretanto, pode-se notar que, exceto as medições de 2 e 6 cm, ambos os concretos tiveram concentrações de cloreto na faixa entre 1 e 1,5 % (g/g), fato que evidencia pequena diferença relativa e que ocorre de forma similar nas demais idades.

Aos traçar um comparativo entre os perfis obtidos das amostras imersas durante o período de 90 dias de exposição e aquelas submetidas ao processo de imersão e secagem, infere-se que não houve diferença significativa entre o comportamento quanto à resistência à

penetração de íons cloreto nos concretos. Entretanto, ressalta-se o favorecimento da difusão do Cl^- inerente aos ciclos realizados que, conseqüentemente, obtiveram-se maiores concentrações aferidas nos concretos ensaiados. Este fato correlaciona que, os concretos imersos durante todo o período tendem a saturação de seus poros e dificultam o mecanismo de difusão dos íons, enquanto os ciclos mantêm os poros parcialmente preenchidos e aceleram a difusão.

A utilização do RPP com alta superfície específica no efeito *filler*, rico em sílica e pozolanicidade podem ser responsáveis pelo fechamento da conectividade entre alguns poros (SONG, 2000), e o RS na compacidade e melhor tortuosidade resultante da mistura com a areia.

Com relação aos teores de cloreto, no Brasil a NBR 12655/2006 estabelece limites que variam de 0,05 a 0,4% em relação à massa de cimento de acordo com as condições ambientais e o tipo de estrutura de concreto. A regulamentação europeia EN 206-1:2016 indica variação de teores de 0,1-1,0% em relação massa de cimento, também a depender das condições citadas anteriormente.

Para a água de amassamento, a NBR 15900/2009 estabelece que ela possua pH igual ou superior a 5 e teor máximo de cloreto de 500 mg/l (concreto protendido ou graute), 1000 mg/l (concreto armado) e 4500 mg/l (concreto simples sem armadura). Ressalta-se que água utilizada atende esses padrões.

A BS 1881-124:1988 regulamenta que o risco de corrosão em concreto armado mediante o conteúdo de íons cloreto, é “desprezível” abaixo de 0,2% e “alto” para valores superiores a 1%, em relação à massa de cimento (RIBEIRO et al., 2010).

Resíduos utilizados em concretos na substituição parcial do cimento podem melhorar suas propriedades, sobretudo, na resistência à penetração de íons cloreto.

Aprianti et al. (2015) mencionam pesquisas em que o uso de resíduos agrícolas melhoraram o desempenho quanto à absorção de água e ingresso de Cl^- .

Torgal e Jalali (2010) relatam que o uso de resíduo cerâmico em pó causa uma pequena redução na resistência do concreto, entretanto, aumenta a durabilidade devido à atividade pozolânica, e que esse uso foi responsável por baixos coeficientes de difusão.

Kim et al. (2014) incorporaram cinzas de fundo provenientes de uma usina termelétrica em concretos de alta resistência e observaram que, embora o coeficiente de difusão do cloreto não tenha sido significativo, as cinzas utilizadas podem reduzir a quantidade de difusão em relação ao concreto convencional. Tal fato, pôde ser atribuído as reações pozolânicas da cinza que não afetaram consideravelmente o sistema de poros.

Medeiros e Helene (2009) testaram a eficácia de tratamento de superfície de concretos como agente hidrofóbicos em revestimento de acrílico, poliuretano e sistemas duplos, e constaram que todos eles reduziram a penetração de íons cloreto para interior dos concretos, principalmente para o revestimento de poliuretano.

Boga, Öztürk e Topçu (2013) concluem que misturas com incorporações minerais devem ser utilizadas para produzirem concretos com baixa permeabilidade à íons cloreto e que a cura em água e o tempo de imersão, influenciam na redução dessa propriedade de durabilidade.

Andrade et al. (2013) analisaram perfis de cloreto em concretos submetidos em ambientes de marés em uma praia e em condições de temperatura e umidade controladas em laboratório. Eles mencionaram que, alguns dos perfis apresentaram um valor máximo de teor de Cl^- próximo a superfície do concreto, sendo os demais pontos do perfil distribuídos de forma irregular.

Costa et al. (2013) conclui que a penetração de cloreto no concreto não saturado não pode ser exclusivamente por mecanismos de difusão. A análise simultânea da difusão e convecção ajudam na melhor compressão dessa penetração em perfil em condições não saturadas e do ambiente, com relação à resistência do material na permissão do uso de uma difusão intrínseca de seu coeficiente. Portanto, a contabilização da sucção capilar devido os gradientes de umidade permite uma melhor interpretação do comportamento do material.

3.2.4 Análises mineralógica, química, microestrutural e termogravimétrica

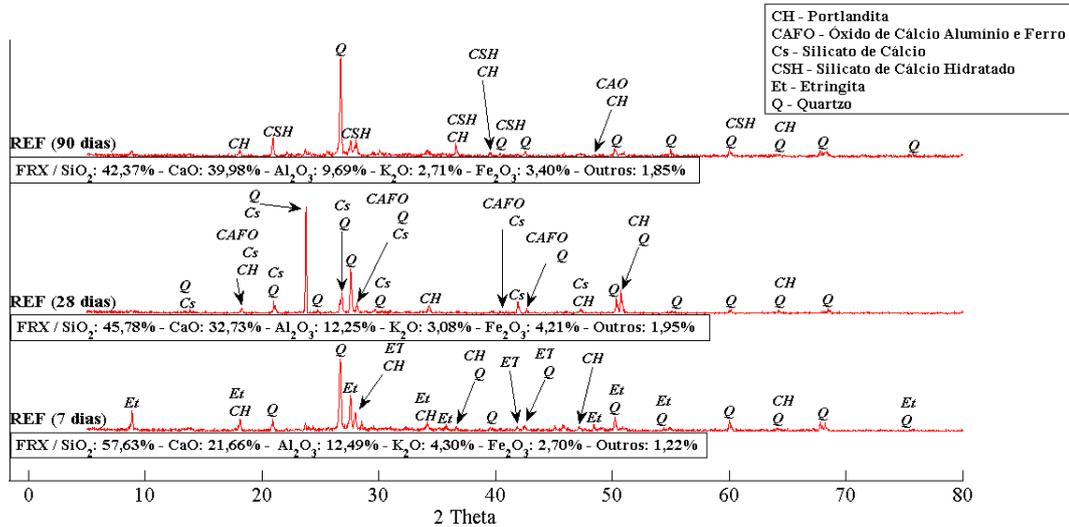
As interpretações análises de DRX estão ilustradas nas Figuras 6 e 7. Os resultados efetuados nos concretos aos 7 dias sugerem a presença de majoritariamente de quartzo, mineral abundante nos agregados e presente no C-S-H. Também foi sugerida a presença de portlandita, hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o qual é um composto comum nas reações de hidratação do cimento, proveniente da maior quantidade de cálcio oriunda da composição química do CP V ARI RS.

Tais resultados são convergentes com as análises de FRX, pois o dióxido de silício e óxido de cálcio representaram as maiores porcentagens nas composições de ambos concretos. A presença de etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) também foi verificada em alguns picos, aferição comum nas primeiras idades devido a cinética das reações.

Segundo Neville (2016), acredita-se que o C_4AF se hidrate na forma de aluminato de cálcio hidratado e uma fase amorfa, bem como o dióxido de ferro (Fe_2O_3) faça parte em sua

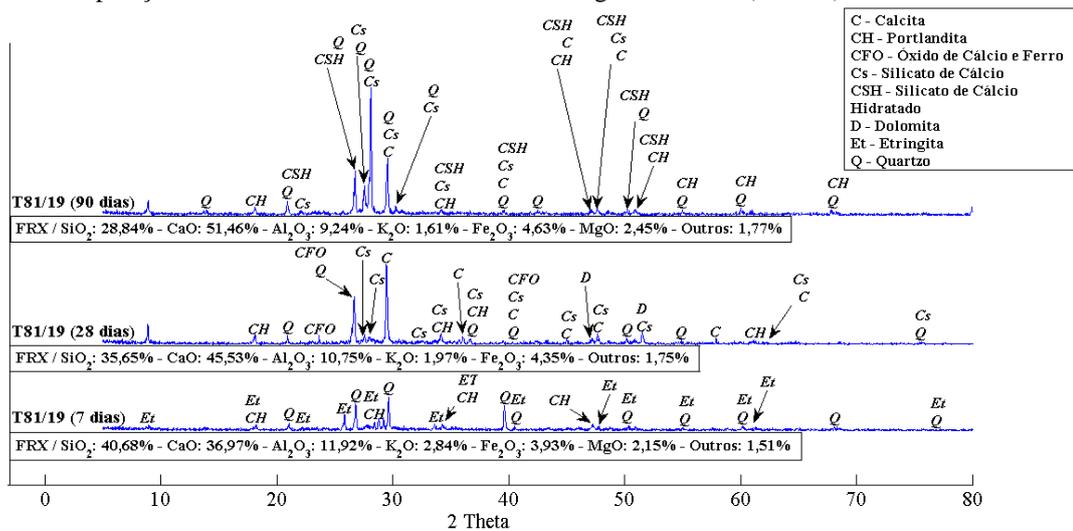
fase sólida. Óxidos de ferro e alumínio são indicados nas composições químicas dos concreto em todas as idades, no cimento, no RPP e no RS.

Figura 6: Composições em DRX e FRX dos concretos ao longo das idades (REF).



Fonte: Autor (2019).

Figura 7: Composições em DRX e FRX dos concretos ao longo das idades (T81/15).



Fonte: Autor (2019).

Ao comparar as análises de FRX aos 7 dias, nota-se que embora o dióxido de silício seja o principal componente químico de ambos concretos, sua porcentagem é reduzida em face do aumento de óxido de cálcio, o qual foi quase duplicado no traço T81/15 ($Ca/Si=0,91$) em relação ao REF de ($Ca/Si=0,37$). Esse fato pode ser atribuído a grande quantidade de RS presente devido ao CaO quantioso.

Aos 28 dias, verifica-se a inversão de dióxido de silício por óxido de cálcio no concreto T81/15, bem como o aumento desse componente no REF. Essa mudança pode

indicar a evolução da hidratação do cimento no concretos, formação de C-S-H e, em específico, a formação de portlandita (CH) e calcita (CaCO_3) como possível influência do RS.

O aumento da relação Ca/Si é bastante salutar para formação do C-S-H, tendo em vista que associa-se valores próximos a 2. Para o concreto T81/15, tal taxa de crescimento é mais acentuada em relação ao REF, sobretudo dos 28 aos 90 dias em valores de: 1,28 e 1,78. O teor de sílica junto da pozolanicidade do RPP podem ser fatores preponderante nesta premissa.

Entretanto, a presença do magnésio verificada em todas idades do T81/15 oriundo dos 5,88% da dolomita em composição química do RS e dos 7,04% do óxido de magnésio proveniente do desgaste abrasivo do porcelanato, podem ser prejudiciais ao concreto quanto à expansões tardias, a depender do seu grau de cristalinidade.

Neville (2016) relata que outro efeito deletério pode ocorrer na reação entre o $\text{Mg}(\text{OH})_2$ que possui baixa solubilidade, e o C-S-H. O ataque de sulfato de magnésio resulta em efeito principal na integridade do cimento e na destruição do C-S-H com formação de gipsita e etringita (AL DULAIJAN, 2007; SIAD et al., 2015; TAN et al., 2017).

Zhao et al. (2019) investigaram os efeitos do magnésio na deterioração e na difusão de sulfato em concretos e constataram que, o desenvolvimento da resistência à compressão foi retardado pelo magnésio presente na solução de sulfato, bem como diminuição do ataque de sulfato em decorrência diminuição da difusão de sulfatos

Aos 90 dias nota-se a presença de hidróxido de cálcio e C-S-H predominando em ambos concretos. Nessa idade verifica-se que o REF estacionou na relação $\text{Ca/Si}=0,94$ e alta relação de 1,78 para o T81/15, a qual justifica a quantidade de picos sugeridos como CH e C-S-H, que podem indicar a iniciação do desenvolvimento das reações pozolânicas.

A atividade pozolânica é um processo lento e ocorre em idades mais avançadas do concreto, a presença de magnésio pode ter retardado tal reação. Essa proposição pode estar associada aos ensaios de resistência.

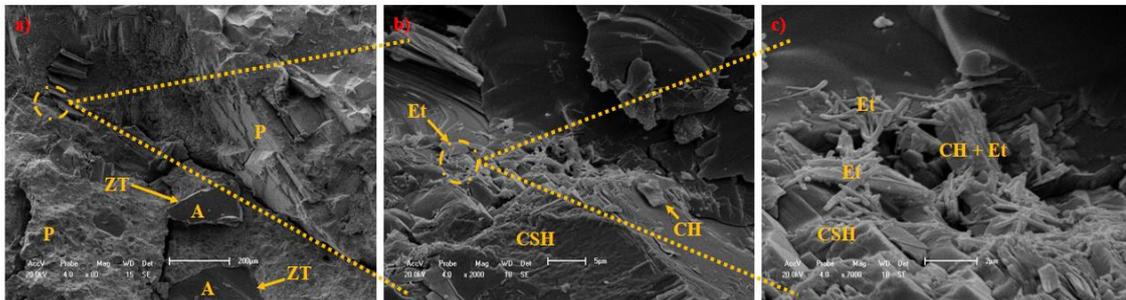
Os MEVs dos REF e T81/15 aos 7 dias nas Figuras 8 e 9 revelam a presença dos componentes de hidratação do cimento C-S-H, CH e etringita. A Figura 8b, com ampliação de 2kx, indica maior formação de C-S-H com algumas placas de portlandita, ambos rodeados de aglomerados de cristais aciculados de etringita, em detalhe na Figura 8c.

As ampliações das Figuras 8a (80x) e 9a (150x) ilustram imagens gerais dos concretos analisados, desta forma, permitindo a visualização da interação dos agregados (A) com a pasta (P), bem como a baixa aderência com entre eles através da zona de transição (ZT).

Com relação a etringita, percebe-se que sua detecção não é simples, devido ao difícil acesso do EDS em poros rodeados por agregados de sílica e à quantidade de C-S-H em sua

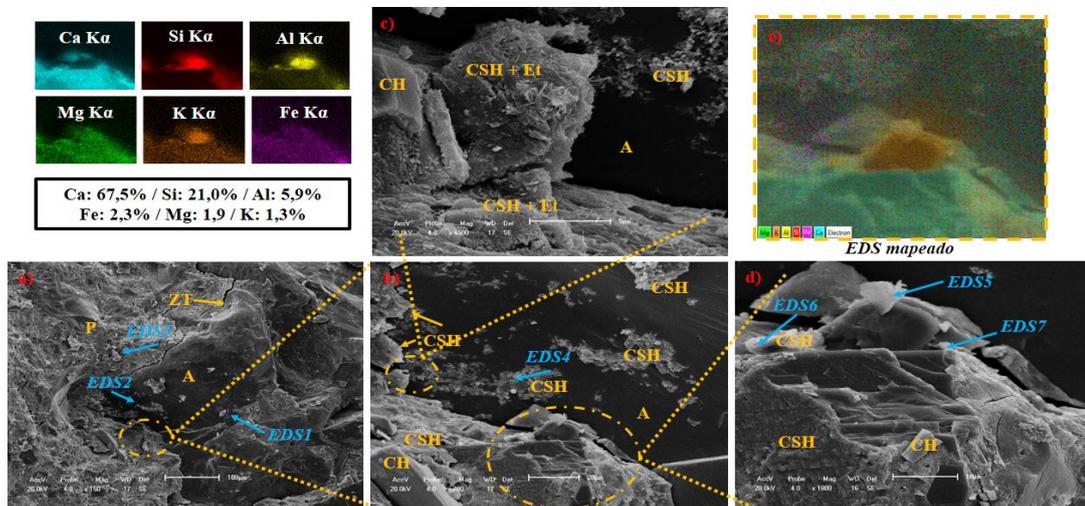
vizinhança (MEDINA et al., 2012b), necessitando assim de maiores ampliações conforme as Figuras 8c (4,5kx) e 9c (10kx).

Figura 8: MEV do REF aos 7 dias.



Fonte: Autor (2019).

Figura 9: MEV/EDS do T81/15 aos 7 dias.



Fonte: Autor (2019).

Segundo Tosun e Baradan (2010) o monossulfaluminato é difícil de ser encontrado por causa da pequena dimensão dos cristais.

Foram realizados EDS pontuais para aferição da composição química quanto a identificação dos compostos hidratados do cimento através da relação Ca/Si, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Relação Ca/Si no concreto T81/15 aos 7 dias.

Pontos de EDS	EDS1	EDS2	EDS3	EDS4	EDS5	EDS6	EDS7
Ca/Si	1,885	2,048	2,985	2,236	0,965	1,884	1,298

Fonte: Autor (2019).

Os EDS 1 e 6 indicam que os compostos podem ser de C-S-H, pois valores compreendidos para a relação Ca/Si de ente 1,7-1,8 remetem a este produto de hidratação (RICHARDSON, 2000). Diamond (1976) menciona que provavelmente esta relação é

próxima de 2. Pesquisas relatam variações de Ca/Si de 0,8-2,3, ou até mesmo superiores (ZHANG, 2000; PELLENQ e VAN DAMME, 2004).

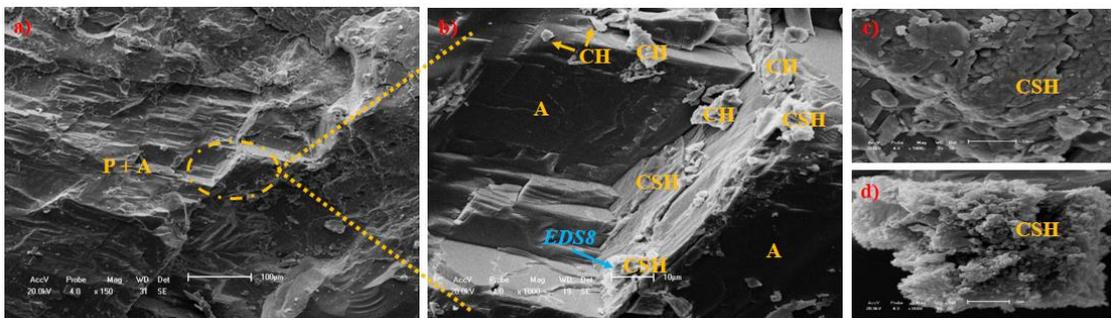
Desta forma, os EDS 2-4 sugerem a formação de C-S-H devido aos altos valores de Ca/Si (jenita e portlandita), bem como baixo $Ca/Si=1,298$ (tobermorita) referente ao EDS7 (KUNTHER, LOTHENBACK E SKIBSTED, 2015). A morfologia também sugere ser característica com organização estrutural de aglomerado de nanocristais, melhor representação do C-S-H em sistemas cimentícios (KUNTHER, FERREIRO e SKIBSTED, 2017).

Segundo Lothenbach e Nonat (2015) o C-S-H apresenta forte relação Ca/Si devido a disponibilidade inicial de cálcio no sistema da matriz da pasta.

A Figura 9e ilustra a representação química mapeada por EDS da Figura 9d (1,8kx). A partir dela, percebe-se a forte presença de cálcio seguido de sílica, fato de corroboram as altas relações de Ca/Si das medições dos EDS pontuais.

Pelisser, Gleize e Mikowski (2009) mencionam que não existem modelos consensuais da estrutura do C-S-H relacionada a sua composição química, nano e microestrutura com as suas propriedades físicas e mecânicas. Sendo assim, essa dificuldade está relacionada intimamente com a complexidade de sua estrutura.

Figura 10: MEV/EDS do REF aos 28 dias.



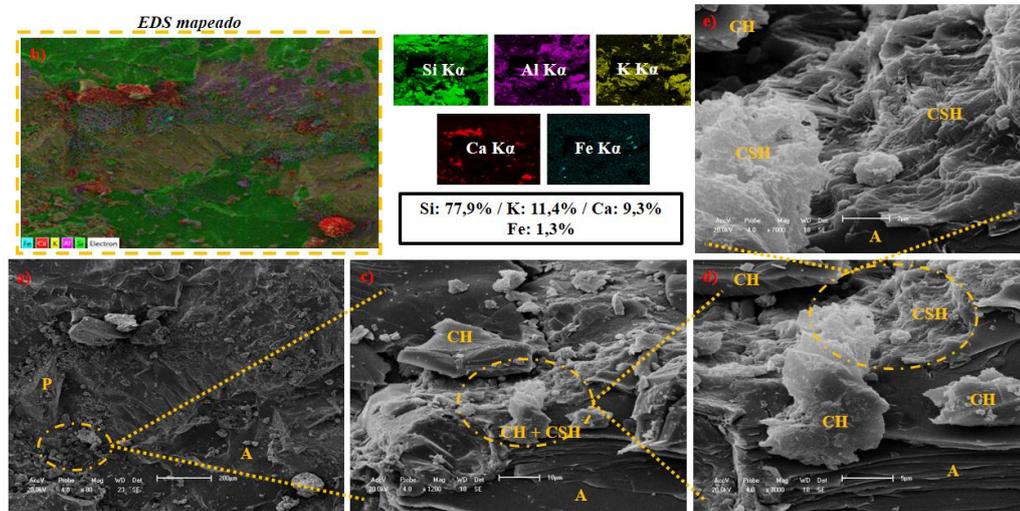
Fonte: Autor (2019).

Aos 28 dias, verifica-se nos MEVs dos concretos maior densificação, continuidade e compacidade da matriz cimentícia, proveniente da ocorrência de grande parte das reações de hidratação do cimento.

A morfologia característica do gel de sílica também é sugerida através de uma organização estrutural quase amorfa (DIAMOND, 2004) de aglomerado de nanocristais em multiescala (Figuras 10c e 10d - 1,8 e 8kx) e (Figuras 11d e 11e - 3 e 7kx). A presença de placas cristalinas hexagonais de CH são registradas aos redores do C-S-H e na região periférica dos agregados.

O EDS8 pontual no MEV do concreto REF sugere ser C-S-H devido a sua estrutura morfológica e a relação Ca/Si igual a 1,858.

Figura 11: MEV/EDS do T81/15 aos 28 dias.



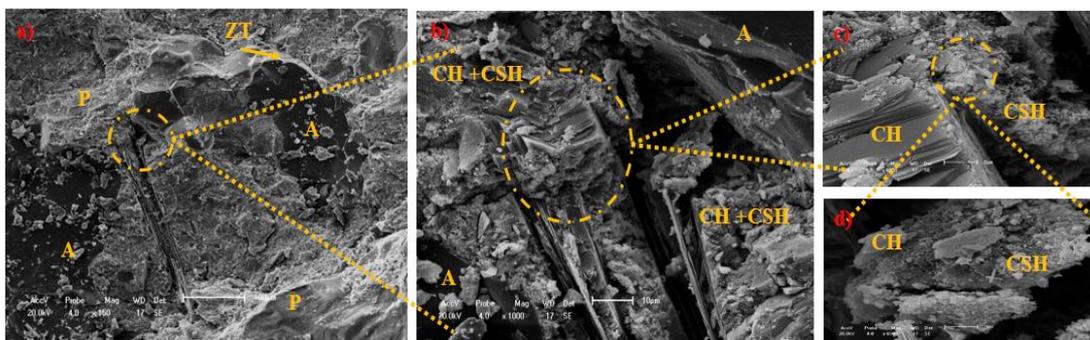
Fonte: Autor (2019).

Já o EDS mapeado da Figura 11b referente à ampliação da Figura 11a de 80x, refere-se a 77,9% de sílica e apenas 9,3% de cálcio. Tais valores remetem a concentração de agregado graúdo e as concentrações localizadas de CH e C-S-H, principalmente em detalhes nas regiões ampliadas das Figuras 11c, 11d e 11e.

O espectro de alumínio e ferro podem ser provenientes das composições químicas da areia, do cimento e dos resíduos, oriundos da alumina e do óxido de ferro.

Aos 90 dias de idade do concreto pode-se constatar a rede de C-S-H e os cristais de portlandita bem definidos, porém, menos frequentes no traço T81/15 (Figuras 12 e 13).

Figura 12: MEV do REF aos 90 dias.

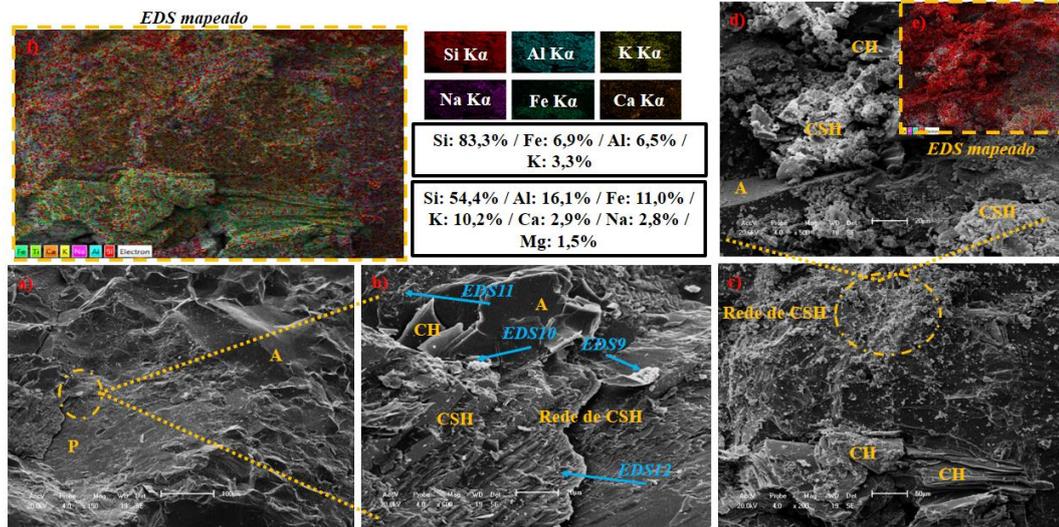


Fonte: Autor (2019).

A Figura 13d (500x) ilustra um aglomerado de partículas de C-S-H e no EDS mapeado em detalhe da Figura 13e, há grande concentração de sílica, que pode ser resultante das fases iniciais de atividade pozolânica proveniente do RPP.

Os EDS pontuais da Figura 13b (600x) imprimem relações Ca/Si em que o teor de cálcio é reduzido, devido a presença do quartzo proveniente dos agregados e das reações pozolânicas. Garcia, Mendoza e Sharp (1999) determinaram indiretamente os valores da relação Ca/Si para o gel de C-S-H e sugeriram que, à medida que essa razão é reduzida há maior formação de CH em função da hidratação do C_3S .

Figura 13: MEV/EDS do T81/15 aos 90 dias.



Fonte: Autor (2019).

Entretanto, Richardson (2000) menciona que materiais pozolânicos podem reduzir significativamente a relação Ca/Si, por exemplo, o uso da sílica ativa resultou em valores de 0,7 a 0,8. Desta forma, a relação Ca/Si do EDS10 é igual a 0,765, valor que pode evidenciar a redução de CH e possível atividade pozolânica. Medina, Rojas e Frías (2012b) verificaram redução dessa relação com o uso de agregado reciclado cerâmico.

O EDS mapeado da Figura 13f referente à ampliação da Figura 13c (200x) ilustra os diversos componentes da pasta cimento e os devidos elementos químicos correspondentes. Em comparativo com a Figura 11 (aos 28 dias) percebe-se notória redução de cálcio localizada, quase 3 vezes inferior. Tal fato pode sugerir a redução de sua disponibilidade resultante da atividade pozolânica.

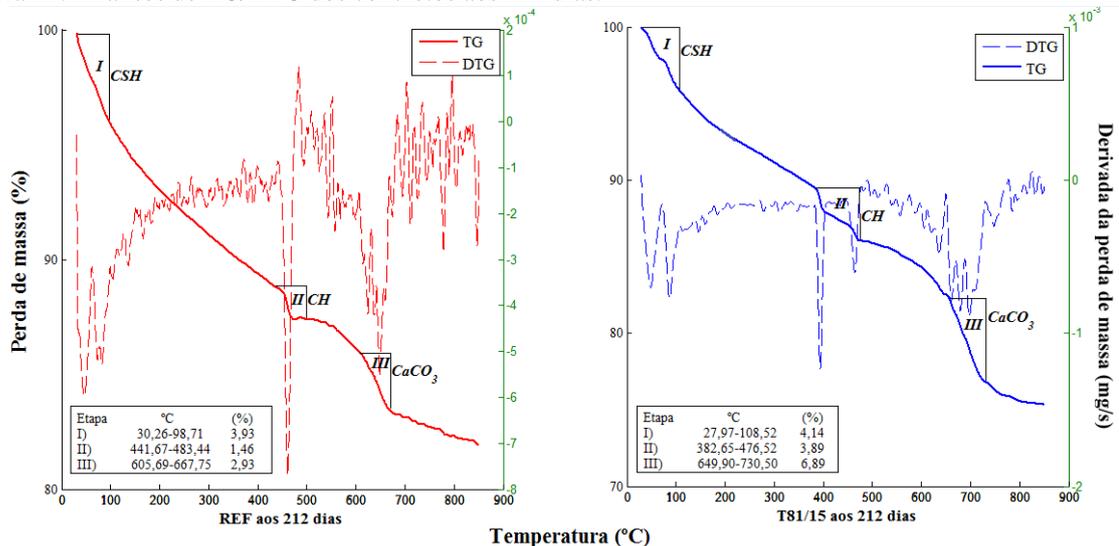
É interessante mencionar a presença de 1,5% de magnésio, que em ambientes agressivos de sulfatos combinados com a calcita ($CaCO_3$) oriunda do RS, podem ajudar na formação de taumasita com o provimento do C-S-H. Por isso, mesmo que o cimento utilizado seja resistente à sulfatos, com baixo teor de C_3A (aluminato tricálcico); tal processo ainda pode ocorrer diferentemente da formação de etringita, que se forma enquanto existir alumina na solução de poros do concreto.

Com efeito, podem haver processos expansão do concreto através da precipitação de brucita $Mg(OH)_2$ de baixa solubilidade e ataque ao CH na formação de gipsita ($CaSO_4$), com decorrente redução de pH da solução dos poros do concreto.

As análises termogravimétricas sugerem as perdas de massa dos compostos de hidratação do cimento em três etapas nos concretos produzidos, a partir da Figura 14.

Na primeira etapa (I) em ambos concretos, é possível verificar a formação de dois picos da derivada da perda de massa, que podem evidenciar a retirada da umidade da solução de poros concretos, bem como a perda da pequena quantidade de etringita e da desidratação do C-S-H que pode ter sido estendido até aproximadamente 440 °C para o REF e 380 °C para o T81/15.

Figura 14: Análises de TG/DTG dos concretos aos 212 dias.



Fonte: Autor (2019).

A temperatura de perda de água dos compostos hidratados dependem da quantidade disponível de CaO e SiO_2 presente na matriz cimentícia (VEDALAKSHMI et al., 2003).

Song et al. (2018) relatam pesquisas que apontam que a temperatura de perda etringita pode ser de até 130 °C, do C-S-H à 120 °C, do CH de aproximadamente até 460 °C e de carbonato de cálcio numa faixa de 520 a 950 °C.

Para o C-S-H o processo de perda pode se estender a temperatura aproximadas de 500 °C, conforme (COLLIER et al., 2008).

Na segunda etapa (II) a desidroxilação de CH foi superior para o concreto com resíduos, quase 2,7 vezes em relação ao REF. Os picos relacionados a essa perda foram de entre 441,67-483,44 °C para REF e de 382,65-476,52 °C para o concreto T81/15.

Kunther, Lothenback e Skibsted (2015) aferiram a perda de hidróxido de cálcio entre as temperaturas 400 e 450 °C com parte detectável para alta relação Ca/Si, e de até 500 °C para o C-S-H.

Para o REF a perda de C-S-H pode ser evidenciada até a temperatura de 441,52 °C com porcentagem de massa consumida de 11,26%. Quanto ao T81/15, o término de consumo ocorreu em temperatura inferior (382,48 °C) com perda registrada de 10,48%.

É interessante notar que a perda de CH é sugerida pela formação de dois picos para o T81/15, diferentemente do pico único do REF. A grande quantidade de calcita presente no RS pode ter sido essencial para o aumento da disponibilidade desse componente, haja vista a redução de 15% do cimento devido a substituição de RPP. Essa premissa ainda pode justificar a sugestão da perda de CaCO_3 acima de 600 °C para ambos concretos e por ela ser superior para o T81/15 na terceira etapa (III).

Ressalta-se também que a maior perda CH registrada para esse concreto pode estar associada a atividade pozolânica do RPP. Jacoby e Pelisser (2015) verificaram atividade pozolânica com substituições de RPP por cimento através da reação entre o CH com a sílica do RPP.

4 CONCLUSÕES

A partir dos estudos realizados no tocante às substituições simultâneas de 15% de RPP e 81% de RS, respectivamente sobre o cimento e a areia, é possível compreender o comportamento das propriedades no estado fresco e endurecido desse concreto aliados de análises combinadas de DRX, FRX, MEV, TG/DTG em diferentes idades. Desta forma, pôde-se asseverar viabilidade técnica comparada a concretos convencionais e garantir mais uma alternativa de sustentabilidade, através da utilização de resíduos na minimização de impactos ambientais, diante das condições utilizadas.

Com efeito, baseado nos resultados obtidos quanto aos diferentes tipos de ensaios, podem ser listadas as seguintes conclusões:

1 - No estado fresco obteve-se abatimento do concreto T81/15 2,2 cm inferior ao REF, mas que tal diferença ainda mantiveram ambos concretos em mesmo nível de classificação de aplicações em elementos estruturais, de acordo com normas nacionais e internacionais. Desta

forma, nessas condições de produção o RPP e RS substituído não causaram efeito significativo na trabalhabilidade. A massa específica desse concreto foi superior ao REF, tendo em vista, a influência da maior massa específica do RS.

2 - As propriedades físicas de porosidade, absorção total e por capilaridade tiveram melhores desempenhos aferidos no concreto T81/15, sobretudo, a partir dos 28 dias. Os ensaios combinados inferiram menor conectividade de poros desse concreto, o que contribuiu para maior resistência de agentes agressivos quanto a durabilidade de sua estrutura de poros. As massas específicas do estado endurecido não apresentaram diferenças contrastantes.

3 - A velocidade do pulso ultrassônico indicaram excelente qualidade dos concretos produzidos e estimativas do módulo de elasticidade dinâmico que demonstraram a similaridade com os valores de massa específica no estado endurecido e na rigidez à deformações.

4 - Os resultados de resistência a compressão e tração demonstraram que as substituições parciais de RPP e RS pouco afetaram tais propriedades relativas ao REF, de modo que a maior diferença entre os concretos foi aos 7 dias de 2,63 MPa para compressão e 0,56 MPa para tração.

5 - O concreto T81/15 apresentou ser mais durável quanto resistência à penetração de íons cloreto, pois foram medidas menores profundidades e concentrações Cl^- , desta forma, confirmando os ensaios físicos de porosidade e absorção total e por capilaridade. Resultados influenciados pelo efeito *filler* e pozolanicidade do RPP, bem como na compactidade e tortuosidade da mistura da areia com RS.

6 - A alcalinidade dos concretos foi reduzida por exposição de íons cloreto em câmara acelerada ao longo das idades. Os resíduos não influenciaram significativamente no pH em relação ao REF.

7 - As análises de DRX sugeriram etringita apenas aos 7 dias e forte presença amorfa-cristalina de C-S-H e CH em varredura 2θ entre 20° e 30° em todas as idades de ambos concretos, associadas ao quartzo e silicato de cálcio.

8 - As análises de FRX demonstraram o aumento da relação Ca/Si para o concreto T81/15 com teor majoritário de cálcio a partir dos 28 dias. Enquanto o REF manteve a sílica, o aumento de Ca foi evidente, entretanto, em taxas inferiores.

9 - As análises microestruturais dos concretos corroboram as análises de DRX e FRX, bem como as propriedades físicas e mecânicas, através da densificação da matriz cimentícia com a rede de C-S-H e placas hexagonais de CH na região periférica e presença de etringita verificada apenas nas idades iniciais.

10 - Os EDS realizados no traço T81/15 indicaram a grande presença de C-S-H através da relação Ca/Si aproximadamente de 1,8 nas análises pontuais. Nas análises de EDS mapeadas, os espectros de Si, Ca, Al, Fe, e Mg foram coerentes com os FRX e com mineralogia do quartzo, calcita, alumina, óxidos de ferro, dolomita e óxidos de magnésio presentes nos resíduos.

11 - As análises de TG/DTG sugeriram maiores consumos das fases hidratadas do cimento para o traço T81/15, sobretudo, do CH que implicada da reatividade com o RPP por atividade pozolânica, justificado no maior consumo de C-S-H resultante dessa reação. Também, houve maior consumo de CaCO_3 devido a maior disponibilidade de cálcio oriunda do RS.

12 - Embora tenha havido atividade pozolânica, a presença de magnésio pode ter retardado tal reação, isso pode ser associado aos resultados de resistência mecânica aos 90 dias.

5 REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 12655 (2015) – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – procedimento. Rio de Janeiro.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 15900 (2009) – Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 5739 (2018): Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 6118 (2014c) – Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 7222 (2011): Concreto e argamassa – Determinação das resistências à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 8802 (2019): Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 8953 (2015) – Concretos para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 9778 (2009): Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 9779 (2012): Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 9833 (2009): Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR NM 67 (1998): Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 5738 (2016). Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, Brasil.

ADAMSON, M.; RAZMJOO, A.; POURSAEE, A. *Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate.* **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 426-432, 2015.

AHMAD, S. *Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction – a review.* **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 459-471, 2003.

AL DULAIJAN, S. U. *Sulfate resistance of concrete of plain and blended cements exposed to magnesium sulfate solutions.* **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1792-1802, 2007.

ALIABDO, A. A. et al. *Utilization of crushed clay brick in concrete industry.* **Alexandria Engineering Journal**, v. 53, p. 151-168, 2014.

ALVES, A. V. et al. *Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates.* **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 103-113, 2014.

ANDERSON, D. J.; SMITH, S. T.; AU, F. T. K. *Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate.* **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 20-28, 2016.

ANDRADE, C. et al. *Testing and modelling chloride penetration into concrete.* **Construction and Building Materials**, v. 39, p. 9-18, 2013.

ANN, Y. K.; SONG, H. W. *Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete.* **Corrosion Science**, v. 49, p. 4113-4133, 2007.

APRIANTI, E. et al. *Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review.* **Construction and Building Materials**, v.74, p. 176-187, 2015.

ASTM – American Society for Testing and Materials. *ASTM C 597: Standard Test Method for pulse velocity through concrete: Annual Book of ASTM Standards.* Philadelphia: ASTM, 2016. 4p.

AWOYERA, P. O. et al. *Characterization of ceramic waste aggregate concrete.* **Housing and Building National Research Center**, v. 14, p. 282-287, 2016.

BARLUENGA, G; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. *Self-levelling cement mortar containing grounded slate from quarrying waste.* **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1601-1607, 2010.

BARTOS, P. **Fresh concrete.** Elsevier, Amsterdam, 1992. 292p.

BENOUIS, A.; GRINI, A. *Estimation of concrete's porosity by ultrasounds*. **Physics Procedia**, v. 21, p. 53-58, 2011.

BERENGUER, R. et al. *Verificação de penetração de cloretos em corpos de prova parcialmente imersos em água do mar em Recife, Pernambuco*. **Revista ALCONPAT**, v. 2, p. 108-122, 2018.

BOGA, A. R.; ÖZTÜRK, M.; TOPÇU, I. B. *Using ANN and ANFIS to predict the mechanical and chloride permeability properties of concrete containing GGBFS and CNI*. **Composites: Part B**, v. 45, p. 688-696, 2013.

BREYSSE, D. *Nondestructive evaluation of concrete strength: Na historical review and new perspective by combining NDT methods*. **Construction and Building Materials**, v. 33, p. 139-163, 2012.

CHENG, H. *Reuse research progress on waste clay brick*. **Procedia environmental Sciences**, v. 31, p. 218-226, 2016.

CHIA, K. S.; ZHANG, M. H. *Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete*. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 639-645, 2002.

CHOI, Y. W. et al. *Utilization of tailings from tungsten mine waste as a substitution material for cement*. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2481-2486, 2009.

COLLIER, V. et al. *The influence of water removal techniques on the composition and microstructure of hardened cement pastes*. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 737-744, 2008.

COSTA, A. et al. *Modelling of chloride penetration into non-saturated concrete: Case study application for real marine offshore structures*. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 217-224, 2013.

COUTINHO, M. J. A. R. S. **Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem**. 1º ed, FEUP EDIÇÕES, Porto, 2005, 444p.

DAMINELI, B. L. et al. *Measuring the eco-efficiency of cement use*. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 555-562, 2010.

DIAMOND, S. *C/S mole ratio of C-S-H gel in a mature C₃S paste as determined by EDXA*. **Cement and Concrete Research**, v. 3, p. 413-416, 1976.

DIAMOND, S. *The microstructure of cement paste and concrete- a visual primer*. **Cement and Concrete Composites**. V. 26, p. 919-933, 2004.

EUROPEAN STANDARD EN 206-1: Concrete – Specification, performance, production and conformity, CEN/TC 104 – Concrete and related products, 2016.

FIGUEIREDO, E. P.; MEIRA, G. *Corrosión de armaduras de estructuras de hormigón*. **Boletim Técnico ALCONPAT BT 06**, Mérida, p. 28, 2013.

FROTTÉ, C. *Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição de parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD*. **Revista Matéria**,

v. 2, versão online, 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151770762017000200419&lng=en&nrm=iso&tlng=pt. Acessado em 30 de março de 2019.

GARCIA, J. I. E.; MENDOZA, G.; SHARP, J. H. *Indirect determination of the Ca/Si ratio of the C-S-H gel in Portland cements*. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1999-2003, 1999.

GENCEL, O. et al. *Properties of concrete paving blocks made with waste marble*. **Journal of Cleaner Production**, v. 21, p. 62-70, 2012.

GOMES, J. P. C. et al. *Potential for reuse of tungsten mining waste-rock in technical-artistic value added products*. **Journal of Cleaner Production**, v. 25, p. 34-41, 2012.

GUERRA, I. et al. *Eco-efficient concretes: Impact of the use of White ceramic powder on the mechanical properties of concrete*. **Biosystems Engineering**, v. 96, p. 559-564, 2007.

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

HALICKA, A.; OGRODNIK, P.; ZEGARDLO, B. *Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate*. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 295-305, 2013.

HAUSSMANN, D. A. *A probability model of steel corrosion in concrete*. **Materials Performance**, v. 10, p. 64-68, 1998.

HERNÁNDEZ, M. G. et al. *Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDT*. **Ultrasonics**, v. 38, p. 531-536, 2000.

HIGASHIYAMA, H. et al. *Chloride ion penetration in mortar containing ceramic waste aggregate*. **Construction and Building Materials**, v. 33, p. 48-54, 2012

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. IBRACON, 3^a ed. São Paulo, 2017.

ISMAIL, Z. Z.; JAEEL, A. J. *A novel use of undesirable wild giant reed biomass to replace aggregate in concrete*. **Construction and building Materials**, v. 67, p. 68-73, 2014.

KIM, H. K. et al. *Improved chloride resistance of high-strength concrete amended with coal bottom ash for internal curing*. **Construction and Building Materials**, v.71, p. 334-343, 2014.

KIM, M. et al. *Application of colorimetric method to chloride diffusion evaluation in concrete structures*. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 239-245, 2013.

KUNTHER, W.; FERREIRO, S.; SKIBSTED, J. *Influence of the Ca/Si ratio on the compressive strength of cementitious calcium-silicate-hydrate binders*. **Journal Materials Chemistry A**, v. 5, p. 17401-17412, 2017.

- KUNTHER, W.; LOTHENBACH, B.; SKIBSTED, J. *Influence of the Ca/Si ratio of the C-S-H phase on the interaction with sulfate ions and its impact on the ettringite crystallization pressure.* **Cement and Concrete Research**, v. 69, p. 37-49, 2015.
- LAFHAJ, Z. et al. *Correlation between porosity, permeability, and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content.* **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 625-633, 2006.
- LOTHENBACH, B.; NONAT, A. *Calcium silicate hydrates: solid and liquid phase composition.* **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 57-70, 2015.
- MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. *Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorptio.* **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1476-1484, 2009.
- MEDINA, C.; FRÍAS, M.; ROJAS, M. I. S *Micostructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate.* **Cement and Concrete Composites**, v. 31, p. 112-118, 2012b.
- MEDINA, C.; ROJAS, M. I. S.; FRÍAS, M. *Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes.* **Cement and Concrete Composites**, v. 34, p. 48-54, 2012a.
- MEIRA, G. R. et al. *Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmospheres zone.* **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 289-298, 2014
- MELO, F. L. **Durabilidade de betões com metacaulino – propagação de cloretos.** Dissertação (Mestrado), Universidade de Aveiro, Aveiro, 2013, 131p.
- MONDANI, P. O; VYAWAHARE, M. R. *Utilization of bagasse ash as a partial replacement of fine aggregate in concrete.* **Procedia Engineering**, v. 51, 25-29, 2013.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** Editora Bookman, 5ª ed. Porto Alegre, 2016.
- PAIVA, E. H. G. **Avaliação do concreto de cimento Portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013 105p.
- PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P.; MIKOWSKI, A. *Propriedades nanomecânicas do silicato de cálcio hidratado de síntese.* **Revista Ambiente Construído**, v. 42, p. 129-139, 2009.
- PELLENQ, R. J. M.; VAN DAMME, H. *Why does concrete set? The nature of cohesion forces in hardened cement-based material.* **Material Research Society Bulletin**, v.5, p. 319-323, 2004.
- PENTEADO, C. S. G.; CARVALHO, E. V.; LINTZ, R. C. *Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing.* **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 514-520, 2016.

- PYO, S. et al. *Effects of quartz-based mine tailings on characteristics and leaching behavior of ultra-high performance concrete*. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 110-117, 2018.
- QASRAWI, H. Y. *Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted*. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 739-746, 2000.
- RASHAD, A. *Cementitious materials and agricultural wastes as natural fine aggregate replacement in conventional mortar and concrete*. **Journal of Building Engineering**, v. 5, p. 119-141, 2016.
- REAL, L. V. et al. *Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte*. **Revista ALCONPAT**, v. 2, p. 149-159, 2015.
- RIBEIRO, D. V. et al. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. Editora Elsevier, 1^o ed. Rio de Janeiro, 2014. 272p.
- RICHARDSON, I. G. *The nature of the hydration products in hardened cement pastes*. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, p. 97-113, 2000.
- ROMANO, P.; BRITO, P. S. D.; RODRIGUES, L. *Monitoring of the degradation of concrete structures in environments containing chloride ions*. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 827-832, 2013.
- SENTHAMARAI, R. M.; MANOHARAN, P. D.; GOBINATH, D. *Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties*. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2413-2419, 2011.
- SHUTTER, G. et al. *Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials*. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 25-36, 2018.
- SIAD, H. et al. *Assesment of the long-term performance of SCC incorporating different mineral admixtures in a magnesium sulphate environment*. **Construction and Building Materials**, v. 80, p. 141-154, 2015.
- SIDDIQUE, R. *Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash*. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1444-1450, 2013.
- SIDDIQUE, R. *Effect of 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, I.; GOMES, J. P. C.; ALBUQUERQUE, A. *Effect of immersion in water partially alkali-activated materials obtained of tungsten mine waste mud*. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 117-124, 2012.
- SONG, G. *Equivalent circuit model for SAC electrochemical impedance spectroscopy of concrete*. **Cement and Concrete Research**, v. 11, p. 1723-1730, 2000.
- SONG, H. et al. *A study of thermal decomposition of phases in cementitious systems using HT-XRD and TG*. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 648-661, 2018.

- SUZUKI, M.; MEDDAH, M. S.; SATO, R. *Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-permance concrete*. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 373-381, 2009.
- TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. *A review of recycled aggregare in concrete applications (2000-2017)*. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 272-292, 2018.
- TAN, Y. et al. *Study on the micro-crack evolution of concrete subjected to stress corrosion and magnesium sulfate*. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 453-460, 2017.
- TORGAL, F. P.; GOMES, J. P. C.; JALALI, S. *Investigations of tungsten mine waste geopolymeric binder: Strength and microstructure*. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 2212-2219, 2008a.
- TORGAL, F. P.; GOMES, J. P. C.; JALALI, S. *Properties of tungsten mine waste geopolymeric binder*. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1201-1211, 2008b.
- TORGAL, F. P.; JALALI, S. *Influence of sodium carbonate addition on the thermal reactivity of tungsten mine waste mud based binders*. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 56-60, 2010b.
- TORGAL, F. P.; JALALI, S. *Reusing Ceramic wastes in concrete*. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 832-838, 2010a.
- TORKITTIKUL, P.; CHAIPANICH, A. *Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes*. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 440-449, 2010.
- TOSUN, K. BARADAN, B. *Effect of ettringite morphology on DEF-related expansiov*. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 271-280, 2010.
- TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. CBI. Sweden, 1982. p. 468.
- VAN DAMME, H. *Concrete material science: past, presente, and future innovations*. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 5-24, 2018.
- VEDALAKSHMI, R. et al. *Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique*. **Thermochemica Acta**, v. 407, p. 49-60, 2003.
- WHITEHURST, E. *Soniscopes test concrete structures*. **Journal Ambiantal Concrete Institute**, v. 47, p. 433-444, 1951.
- WONG, L. C. et al. *Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review*. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, p. 226-239, 2018.
- ZHANG, X. et al. *Nanostructure of calcium silicate hydrate gels in cement paste*. **Journal of American Ceramic Society**, v. 10, p. 2600-2604, 2000.
- ZHAO, G. et al. *Sulfate-induced degradation of cast-in-situ concrete influenced by magnesium*. **Construction and Building Materials**, v. 199, p. 194-206, 2019.

CONCLUSÃO GERAL

A partir dos estudos realizados nesta pesquisa, pode-se constatar que o emprego de RPP e RS em substituições parciais do cimento e da areia na produção de concreto, resultou em propriedades satisfatórias no estado fresco e endurecido, bem como de durabilidade quanto à resistência à penetração de íons cloreto, comparadas ao concreto convencional de referência. Tais aferições tiveram suportes técnicos em regulamentações normativas e pesquisas científicas de relevância nos últimos anos no tocante à esta temática.

É importante ressaltar que, os teores máximos alcançados dos resíduos $RPP=15\%$ e $RS=81\%$, representam economia significativa em suas respectivas substituições dos materiais convencionais, cimento e areia. Tais números, aplicados na produção de concretos através da reprodução dos procedimentos experimentais aplicados nesta pesquisa, poderão representar aproximadamente, uma redução de 75 milhões de toneladas na produção de areia na região nordeste, sobretudo, no Semi-Árido; visto que a projeção de produção para 2019 foi de 154,3 milhões de toneladas de agregados nessa região, e cerca de 60% delas (92,58 milhões) é referente à areia.

Com relação ao cimento, a redução seria de aproximadamente 1,65 milhões de toneladas, a nível nordeste com a substituição do RPP, pois em 2017 foram produzidos estimados 11 milhões de toneladas de cimento.

Com efeito, torna-se imperativo obter como consequência a redução de impactos ambientais no ar, solo e água, pois os processos de produção do cimento e da areia causam diversos impactos através dos aspectos ambientais envolvidos, por exemplo: aquecimento global devido a emissão de gases do efeito estufa (CO_2 e SO_2), poluição do ar e sonora, desmoronamento e erosões, perturbação de *habitats* e redução da biodiversidade, solos inférteis, diminuição da qualidade da água dos leitos dos corpos hídricos. A redução do dióxido de carbono é preponderante, pois pesquisas recentes relatam que para cada tonelada produzida de cimento, uma tonelada desse gás é emitida à atmosfera.

A utilização do RPP e RS em concretos ou materiais cimentícios também ajudam na diminuição dos impactos ambientais de sua própria disposição, tendo em vista que esses resíduos não serão dispostos em localidades que possam contaminar os sistemas ambientais, através de metais pesados e outros contaminantes associados. De modo que, seus respectivos empregos em concretos podem ser uma forma de torná-los inertes ao ambiente e sustentáveis.

Portanto, verifica-se que esta aplicação abordada nesta pesquisa tem resultados benéficos aos aspectos socioeconômicos, à indústria da construção civil e à sustentabilidade relacionada com à exploração e conservação dos recursos naturais.