



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

HUMBERTO MYCAEL MOTA SANTOS

**USO DE RESÍDUO DO POLIMENTO DO PORCELANATO EM CONCRETO COMO
ADIÇÃO E COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR**

Caruaru

2019

HUMBERTO MYCAEL MOTA SANTOS

**USO DE RESÍDUO DO POLIMENTO DO PORCELANATO EM CONCRETO COMO
ADIÇÃO E COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Ana Cecília Vieira da Nóbrega.

Caruaru

2019

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

S237u Santos, Humberto Mycael Mota.
Uso de resíduo do polimento do porcelanato em concreto como adição e como material cimentício suplementar. / Humberto Mycael Mota Santos. – 2019.
98 f.; il.: 30 cm.

Orientadora: Ana Cecília Vieira da Nóbrega.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2019.
Inclui Referências.

1. Concreto. 2. Resíduos como material de construção. 3. Revestimento em cerâmica. 4. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 5. Adição. 6. Cimento. I. Nóbrega, Ana Cecília Vieira da (Orientadora). II. Título.

CDD 620 (23. ed.) UFPE (CAA 2019-240)

HUMBERTO MYCAEL MOTA SANTOS

**USO DE RESÍDUO DO POLIMENTO DO PORCELANATO EM CONCRETO COMO
ADIÇÃO E COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovada em: 26/06/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Ana Cecília Vieira da Nóbrega (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Érika Pinto Marinho (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Givanildo Alves de Azeredo (Examinador Externo)
Universidade Federal da Paraíba

Dedico a Deus, por me conceder a possibilidade de realizar esse trabalho.

Dedico ainda de modo todo especial aos meus pais, meus irmãos e a minha esposa, que em todos os momentos apoiaram e confiaram em mim.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as maravilhas que Ele tem feito em minha vida e pela força e sabedoria concedida para continuar em meio as dificuldades.

Aos meus pais, José Apolônio e Cristiane Valéria, que são os amores da minha vida; pelo amor, ensinamentos e educação dado a mim e pelos sacrifícios realizados para que eu pudesse chegar até aqui.

À minha avó, Sônia Maria, e aos meus irmãos, Cryslyne Cristina e Lucas David, por todo os seus carinhos, incentivos e orações e por sempre me apoiarem e torcerem por minhas conquistas.

À minha melhor amiga e esposa, Eduarda Adriane, por sempre está ao meu lado em todos os momentos, sendo compreensiva, incentivadora e amorosa.

À professora Dr.^a Ana Cecília Vieira da Nóbrega, minha orientadora, por todos os ensinamentos passados durante o mestrado, pela amizade, pela paciência, pela compreensão e pela oportunidade de tornar este mestrado possível.

À professora Dr.^a Érika Pinto Marinho, pelos seus ensinamentos sobre ciências dos materiais e contribuições para este trabalho.

Ao professor Dr. Élder e ao físico Irenaldo por terem contribuído para a realização dos ensaios de resistividade elétrica.

Aos professores do PPGECAM, pelos ensinamentos essenciais para minha formação acadêmica.

Aos amigos de mestrado, Jonatercio, Marllon e Rodrigo, pelo apoio e suporte necessário nos momentos fundamentais.

Aos técnicos, Fabíola e Everton, pela ajuda para a realização de diversos ensaios no laboratório de construção civil.

Aos químicos, Henrique e Agilson, por terem me ajudado com todos os ensaios no laboratório de química.

À secretaria do Programa de pós-graduação, nas pessoas de Marcelo e Euclécia por sempre resolverem os problemas burocráticos, com toda a paciência e boa vontade.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e a PROPESQ – Pró-reitoria para assuntos de pesquisa e Pós-Graduação, pela oportunidade de ser bolsista.

À Fábrica Elizabeth Porcelanatos S. A., pelo resíduo do polimento do porcelanato cedidos para a pesquisa.

À Polimix Concreto, por ter fornecido gentilmente o cimento CP V ARI da marca MIZU, utilizado em toda a pesquisa.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho o meu Muito Obrigado!

“Mera mudança não é crescimento. Crescimento é a síntese de mudança e continuidade, e onde não há continuidade não há crescimento”. (LEWIS, 2013, p. 105)

RESUMO

O resíduo do polimento do porcelanato (RPP) é gerado no processo de produção do porcelanato, em que grande parte são depositado em aterros. Tem-se como objetivo utilizar esse resíduo na produção de concretos sustentáveis, tanto como adição quanto material cimentício suplementar (MCS), e analisar a sua influência em relação às propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido, à cristalografia, à termogravimetria e à emissão de CO₂. Concretos de 30 MPa foram dosados com base no método da Associação Brasileira de Cimento de Portland (ABCP). O RPP foi avaliado como adição nos teores de 10, 20, 30, 40 e 50%, com relação à massa do cimento, e como material cimentício suplementar nos mesmos teores substituindo parcialmente o cimento. Além disso, o consumo de cimento foi mantido constante para todas as misturas, a fim de avaliar a real interferência do RPP. Os resultados mostraram que a incorporação do RPP em ambas as situações, adição e MCS, diminuiu o abatimento, sendo atenuado com o uso de superplastificante. No estado endurecido, todos os concretos com adição e os de substituição de 10-40% apresentaram-se como uma solução viável para o desenvolvimento de estruturas de concreto mais resistentes e duráveis, pois foi obtido maiores resistência à compressão e melhores desempenho nos indicadores de durabilidade. A análise térmica comprovou que o RPP possui atividade pozolânica, e a análise de emissão de CO₂ constatou que a incorporação de RPP como adição e substituição reduz a emissão equivalente de CO₂ por m³ do concreto.

Palavras-chave: Concreto. Resíduo. Polimento do porcelanato. Adição. Material cimentício suplementar.

ABSTRACT

Porcelain tile polishing residue (PPR) is generated in the porcelain tile production process, where much of it is landfilled. The objective is to use this residue in the production of sustainable concretes, both as addition and as supplementary cementitious material (SCM), and to analyze its influence in relation to the properties of concrete in the fresh and hardened states, crystallography, thermogravimetry and emission. of CO₂. 30 MPa concretes were dosed based on the method of the Brazilian Portland Cement Association (ABCP). The PPR was evaluated as addition in the contents of 10, 20, 30, 40 and 50%, in relation to the cement mass, and as supplementary cementitious material in the same contents partially replacing the cement. In addition, cement consumption was kept constant for all mixtures in order to assess the real interference of PPR. The results showed that the incorporation of the PPR in both the addition and the SCM reduced the abatement and was attenuated with the use of superplasticizer. In the hardened state, all addition and replacement concretes of 10-40% proved to be a viable solution for the development of stronger and more durable concrete structures, as higher compressive strength and better performance in the performance indicators were obtained. durability. Thermal analysis showed that PPR has pozzolanic activity, and CO₂ emission analysis found that incorporating PPR as an addition and replacing reduces the equivalent CO₂ emission per m³ of concrete.

Keywords: Concrete. Residues. Porcelain tile polishing. Addition. Supplementary cementitious material.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Equipamento polidor com 6 cabeças polidoras (tijolos abrasivos)..... | 31 |
| Figura 2 - Estocagem do RPP..... | 32 |
| Figura 3 - Micrografia do RPP - elétrons secundários..... | 36 |
| Figura 4 - Ensaio de resistividade elétrica: (a) amostras utilizadas e (b) método adotado..... | 52 |
| Figura 5 - Ensaio de profundidade de carbonatação: (a) ruptura e (b) superfície da amostra com a solução de fenolftaleína..... | 53 |

LISTA DE FLUXOGRAMA

| | |
|---|----|
| Fluxograma 1 - Processo produtivo do resíduo do polimento do porcelanato... | 29 |
| Fluxograma 2 - Etapas do programa experimental..... | 41 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | | |
|--------------|---|----|
| Gráfico 1 - | Produção de porcelanato (m ²) de 2005 a 2015..... | 32 |
| Gráfico 2 - | Produção da lama do RPP (t) de 2005 até 2015..... | 33 |
| Gráfico 3 - | Padrão de difração de raios X do resíduo do polimento de porcelanato..... | 34 |
| Gráfico 4 - | Distribuição do tamanho de partículas do resíduo do polimento de porcelanato..... | 35 |
| Gráfico 5 - | Curva granulométrica do RPP e cimento..... | 57 |
| Gráfico 6 - | Curva granulométrica da areia e brita..... | 58 |
| Gráfico 7 - | Fases cristalinas do cimento..... | 61 |
| Gráfico 8 - | Fases cristalinas do RPP..... | 61 |
| Gráfico 9 - | Curva TG do RPP..... | 63 |
| Gráfico 10 - | Resultados do abatimento do concreto..... | 65 |
| Gráfico 11 - | Resultados da resistência à compressão aos 7 dias..... | 67 |
| Gráfico 12 - | Resultados da resistência à compressão aos 28 dias..... | 68 |
| Gráfico 13 - | Resultados da resistência à compressão aos 91 dias..... | 70 |
| Gráfico 14 - | Resultados da absorção de água aos 28 dias..... | 71 |
| Gráfico 15 - | Resultados da absorção de água por capilaridade aos 28 dias.... | 73 |
| Gráfico 16 - | Resultados da resistência à exposição ambiental de 5 meses.... | 75 |
| Gráfico 17 - | Resultados da resistividade elétrica..... | 79 |
| Gráfico 18 - | Resultados da profundidade de carbonatação..... | 80 |
| Gráfico 19 - | Difratogramas de raios-X dos concretos analisados..... | 82 |
| Gráfico 20 - | Termogravimetria dos concretos analisadas..... | 84 |
| Gráfico 21 - | Resultados do índice de intensidade do ligante..... | 86 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabela 1 - | Estimativa da provável taxa de corrosão em função da resistividade elétrica..... | 25 |
| Tabela 2 - | Análise química dos resíduos polimento e abrasivo separadamente..... | 33 |
| Tabela 3 - | Análise química do RPP..... | 34 |
| Tabela 4 - | Características e composição do cimento utilizado..... | 42 |
| Tabela 5 - | Características do superplastificante utilizado..... | 43 |
| Tabela 6 - | Tabela 6 - Traços de substituição parcial do cimento por RPP com consumo 390 kg/m ³ | 48 |
| Tabela 7 - | Traços com adição de RPP com consumo 390 kg/m ³ | 48 |
| Tabela 8 - | Massa unitária dos materiais..... | 56 |
| Tabela 9 - | Massa específica real dos materiais..... | 57 |
| Tabela 10 - | Diâmetro médio das partículas do cimento e RPP..... | 58 |
| Tabela 11 - | MF e D _{máx} dos agregados utilizados..... | 59 |
| Tabela 12 - | Área superficial específica do cimento e RPP..... | 59 |
| Tabela 13 - | Análise química por FRX do RPP..... | 60 |
| Tabela 14 - | Resultado do índice de consistência das argamassas..... | 64 |
| Tabela 15 - | Resultado do índice de atividade pozolânica..... | 64 |
| Tabela 16 - | Resultados da perda de massa do ataque ácido..... | 77 |
| Tabela 17 - | Perdas de massa (TG/DTG) das pastas analisadas..... | 85 |
| Tabela 18 - | Resultados do potencial de aquecimento global..... | 88 |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 17 |
| 1.1 | Problemática e justificativa..... | 17 |
| 1.2 | Objetivos..... | 19 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 19 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos..... | 19 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA..... | 21 |
| 2.1 | Concreto..... | 21 |
| 2.1.1 | Propriedade do concreto no estado fresco..... | 22 |
| 2.1.2 | Propriedade do concreto no estado endurecido..... | 23 |
| 2.2 | Aditivo superplastificante..... | 25 |
| 2.3 | Adições..... | 26 |
| 2.3.1 | Materiais inertes ou quase inertes (Fíler)..... | 27 |
| 2.3.2 | Materiais pozolânicos..... | 27 |
| 2.4 | Resíduo do polimento do porcelanato..... | 28 |
| 2.4.1 | Características físico/químicas do RPP..... | 33 |
| 2.4.2 | Influência da incorporação do RPP em matrizes de cimento Portland.. | 36 |
| 3 | PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 40 |
| 3.1 | Obtenção e beneficiamento dos componentes do concreto..... | 41 |
| 3.1.1 | Cimento Portland..... | 41 |
| 3.1.2 | Agregados..... | 42 |
| 3.1.3 | Resíduo do polimento do porcelanato..... | 43 |
| 3.1.4 | Água..... | 43 |
| 3.1.5 | Aditivo superplastificante..... | 43 |
| 3.2 | Caracterização dos materiais..... | 44 |
| 3.2.1 | Massa unitária..... | 44 |
| 3.2.2 | Massa específica real..... | 44 |
| 3.2.3 | Distribuição granulométrica..... | 44 |
| 3.2.4 | Área superficial específica por BET | 44 |
| 3.2.5 | Fluorescência de Raios-X (FRX)..... | 45 |
| 3.2.6 | 3.2.6 Difração de Raios-X (DRX)..... | 45 |
| 3.2.7 | Análise térmica..... | 45 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.2.8 | Índice de atividade pozolânica..... | 45 |
| 3.3 | Método de dosagem do concreto..... | 46 |
| 3.3.1 | Determinação dos traços..... | 46 |
| 3.3.2 | Determinação do traço padrão..... | 47 |
| 3.3.3 | Determinação do traço com incorporação do RPP..... | 48 |
| 3.4 | Preparo dos concretos..... | 49 |
| 3.5 | Ensaio no estado fresco..... | 49 |
| 3.5.1 | Abatimento do tronco de cone..... | 49 |
| 3.6 | Ensaio no estado endurecido..... | 49 |
| 3.6.1 | Comportamento mecânico..... | 49 |
| 3.6.1.1 | <i>Resistência à compressão.....</i> | <i>49</i> |
| 3.6.2 | Indicativos de durabilidade..... | 50 |
| 3.6.2.1 | <i>Absorção de água por imersão.....</i> | <i>50</i> |
| 3.6.2.2 | <i>Absorção de água por capilaridade.....</i> | <i>50</i> |
| 3.6.2.3 | <i>Resistência à compressão do concreto exposto ao meio ambiente.....</i> | <i>51</i> |
| 3.6.2.4 | <i>Resistência ao ataque ácido.....</i> | <i>51</i> |
| 3.6.2.5 | <i>Resistividade elétrica.....</i> | <i>52</i> |
| 3.6.2.6 | <i>Profundidade de carbonatação.....</i> | <i>53</i> |
| 3.7 | Análise cristalográfica e térmica..... | 54 |
| 3.7.1 | Difração de Raios-X do concreto..... | 54 |
| 3.7.2 | Termogravimetria do concreto..... | 54 |
| 3.8 | Análise de emissão de CO₂..... | 55 |
| 3.8.1 | Índice de Intensidade do Ligante (IIL)..... | 55 |
| 3.8.2 | Potencial de Aquecimento Global (PAG)..... | 55 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 56 |
| 4.1 | Caracterização dos materiais..... | 56 |
| 4.1.1 | Massa unitária..... | 56 |
| 4.1.2 | Massa específica real..... | 56 |
| 4.1.3 | Distribuição granulométrica..... | 57 |
| 4.1.4 | Área superficial específica pelo método de BET..... | 59 |
| 4.1.5 | Fluorescência de Raios-X (FRX)..... | 60 |
| 4.1.6 | Difração de Raios-X (DRX)..... | 60 |
| 4.1.7 | Análise térmica..... | 62 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.1.8 | Índice de Atividade Pozolânica (IAP)..... | 63 |
| 4.2 | Ensaio no estado fresco..... | 64 |
| 4.2.1 | Abatimento do tronco de cone..... | 64 |
| 4.3 | Ensaio no estado endurecido..... | 66 |
| 4.3.1 | Comportamento mecânico..... | 66 |
| 4.3.1.1 | <i>Resistência à compressão.....</i> | <i>66</i> |
| 4.3.2 | Indicadores de durabilidade..... | 71 |
| 4.3.2.1 | <i>Absorção de água por imersão.....</i> | <i>71</i> |
| 4.3.2.2 | <i>Absorção de água por capilaridade.....</i> | <i>73</i> |
| 4.3.2.3 | <i>Resistência à exposição ambiental.....</i> | <i>74</i> |
| 4.3.2.4 | <i>Resistência ao ataque ácido.....</i> | <i>77</i> |
| 4.3.2.5 | <i>Resistividade elétrica.....</i> | <i>79</i> |
| 4.3.2.6 | <i>Profundidade de carbonatação.....</i> | <i>80</i> |
| 4.4 | Análise cristalográfica e térmica..... | 82 |
| 4.4.1 | Difração de Raios-X do concreto..... | 82 |
| 4.4.2 | Termogravimetria do concreto..... | 83 |
| 4.5 | Análise de emissão de CO₂..... | 86 |
| 4.5.1 | Índice de Intensidade do Ligante (IIL)..... | 86 |
| 4.5.2 | Potencial de Aquecimento Global (PAG)..... | 87 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 89 |
| | REFERÊNCIAS..... | 91 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Problemática e justificativa

A construção civil é um dos setores que mais consome recursos naturais não renováveis, gera grande quantidade de resíduos e, conseqüentemente, contribui para a poluição. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2010), em seu Anuário Mineral Brasileiro (AMB) de 2010, a quantidade de areia comercializada, em 2009, foi de 255.807.975 toneladas; sendo que 96,54% desse material foi consumido pela construção civil. Além disso, outro problema desse setor é o grande consumo de cimento, onde estima-se que, das atividades antropogênicas, a produção de cimento Portland é responsável por 5 a 8% dos gases do efeito estufa, em que essa produção tende a dobrar até 2020 (NAZARI e SANJAYAN, 2017).

Entretanto, a construção civil se mostra favorável para mitigação desses problemas, pois ela consegue reciclar resíduos gerados, além de incorporar resíduos oriundos de outros setores na sua cadeia de produção, onde pode ser citado a utilização do resíduo do polimento do porcelanato (RPP). Esses resíduos podem ser incorporados em concretos, caso seja compatível no sistema, visto que, o concreto é uma mistura que pode absorver diversos tipos de materiais. Com isso, há tendência de produzir cada vez mais concretos sustentáveis utilizando materiais alternativos (JIN, CHEN, e SOBOYEJO, 2015; BERODIER *et al.*, 2018). Empresas dos EUA responsáveis por estudos acerca de concretos sustentáveis revelam que os principais objetivos são a utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS) e agregados alternativos (AA) (JIN, CHEN, e SOBOYEJO, 2015). Destaca-se que outros fatores importantes na produção de concretos sustentáveis, além dos ambientais, está na diminuição do custo (BERODIER *et al.*, 2018); visto que, os materiais incorporados no concreto são na maioria dos casos resíduos; e no comportamento do material desse material incorporado, podendo melhorar a compacidade (efeito fíler) ou gerar compostos cimentantes (efeito pozolânico).

Os resíduos do polimento do porcelanato (RPP) são gerados na etapa final do processo de fabricação do porcelanato, mais precisamente na etapa de polimento, e se apresentam como um pó muito fino, branco e umedecido. Silva (2005) e Santos (2008) destacam os benefícios do reaproveitamento do RPP para as empresas fabricantes de porcelanatos, como: diminuição de resíduos encaminhados para

aterros industriais; soluções de problemas ambientais; economia de energia; e, redução de custo.

Na região nordeste do Brasil, uma empresa de médio porte gera cerca de 50 toneladas de RPP por semana (SOUZA, 2007; NASCIMENTO, 2016); na região sudeste, uma empresa de médio porte produz aproximadamente 140 toneladas desse resíduo (SILVA, 2005); e na região sul, uma empresa de grande porte produz em média 1000 toneladas por semana de RPP (JACOBY e PELISSER, 2015).

O RPP é composto em maior quantidade de sílica, seguido de alumina e óxido de magnésio, sendo este último devido ao abrasivo utilizado no processo de polimento (SILVA, 2005; SOUZA, 2007; SANTOS, 2008; JACOBY e PELISSER, 2015; STEINER, BERNARDIN e PELISSER, 2015; NASCIMENTO, 2016). Em geral, o RPP é composto por fases cristalinas (SILVA, 2005; SOUZA, 2007; JACOBY e PELISSER, 2015; STEINER, BERNARDIN e PELISSER, 2015; NASCIMENTO, 2016), que não é interessante para o processo de pozolanicidade, mas alguns autores realçam sua composição amorfa (SILVA, 2005; JACOBY e PELISSER, 2015; STEINER, BERNARDIN e PELISSER, 2015). Além disso, o RPP não necessita de alta energia adicional para a cominuição e peneiramento; visto que, sua granulometria encontra-se praticamente adequada para utilizar em materiais cimentícios (SOUZA, 2007).

Devido a essas características, foram desenvolvidas algumas pesquisas sobre a incorporação do RPP em materiais cimentícios. Entre essas pesquisas temos a incorporação desse resíduo no concreto (SILVA, 2005; SOUZA, 2007; MEDEIROS *et al.*, 2018), argamassa (SANTOS, 2008; BREITENBACH, 2013; JACOBY e PELISSER, 2015), blocos de concreto (STEINER, 2011), piso intertravado de concreto (PURIFICAÇÃO, 2009; NASCIMENTO, 2016; PENTEADO, CARVALHO e LINTZ, 2016) e concreto autoadensável (LIMA, 2015; MATOS *et al.*, 2018a).

Os resultados obtidos, em algumas pesquisas, evidenciaram influência positiva da utilização do RPP em materiais cimentícios melhorando suas propriedades no estado endurecido, destacando-se a redução da porosidade e permeabilidade, contribuindo para a durabilidade do material devido ao efeito fíler (SILVA, 2005; SOUZA, 2007; JACOBY e PELISSER, 2015; STEINER, BERNARDIN e PELISSER, 2015); aumento da resistência à compressão (SILVA, 2005; SOUZA, 2007; JACOBY e PELISSER, 2015; STEINER, BERNARDIN e PELISSER, 2015); aumento da resistência à compressão ao longo do tempo, por causa das reações pozolânicas (WANG e TIAN, 2009; PELISSER, STEINER e BERNARDIN, 2012); e resistência ao

ataque de sulfato (YUNHONG *et al.*, 2014). De fato, tem sido avaliado como material cimentício suplementar (PELISSER, STEINER e BERNARDIN, 2012; STEINER, 2014; STEINER, BERNARDIN e PELISSER, 2015).

Já no estado fresco, os materiais cimentícios com incorporação de RPP apresentaram diminuição da trabalhabilidade, quando a porcentagem de resíduo aumentava no sistema (SILVA, 2005; SOUZA, 2007; SANTOS, 2008). Isso acontece, provavelmente, em razão de dois fatores: a área superficial específica do RPP ser alta, o que exige mais água na mistura; e as partículas do RPP que possuem formas irregulares e angulosas, que dificultam o efeito de rolamento das partículas (SILVA, 2005; SANTOS, 2008).

Entretanto, não foi encontrado trabalhos que comparassem o efeito do resíduo do polimento do porcelanato (RPP), sendo utilizado como material cimentício suplementar (MCS), ou seja, substituindo parcialmente o cimento, com ele sendo apenas adicionado ao concreto. Além do mais, poucas pesquisas têm analisado indicadores de durabilidade acerca de materiais cimentícios com incorporação do RPP, não sendo encontrado estudos com relação a resistividade elétrica e ataque de ácidos acético e clorídrico.

Logo, pelo fato do concreto ser um dos materiais mais utilizado na construção civil, e o resíduo do polimento do porcelanato (RPP) possuir um bom desempenho em matrizes cimentícias, eles foram escolhidos como materiais de estudos, a fim de produzir concretos sustentáveis com a incorporação do RPP.

1.2 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a influência da incorporação de resíduo do polimento do porcelanato (RPP) no concreto, como material cimentício suplementar (MCS, substituição parcial do cimento) ou adição.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a pozolanicidade do RPP e como suas demais propriedades físico-químicas podem interferir no comportamento do concreto;

- Investigar como a adição do RPP em concretos nos teores de 10, 20, 30, 40 e 50%, interfere nas propriedades do estado fresco (abatimento) e endurecido (resistência à compressão e indicadores de durabilidade: absorção de água total, absorção de água por capilaridade, resistência à exposição ambiental, resistência ao ataque ácido - acético, clorídrico e sulfúrico -, resistividade elétrica e carbonatação);
- Investigar o RPP como MCS em concretos nos teores de 10, 20, 30, 40 e 50%, interfere nas propriedades do estado fresco e endurecido, com relação aos mesmos ensaios destacados anteriormente;
- Avaliar como os concretos com MCS e adição do RPP se comportam em cada ensaio, investigando o porquê de possíveis variações de comportamento;
- Analisar as fases cristalinas e a termogravimetria dos concretos, a fim observar como o RPP em cada traço (MSC e adição) interfere na microestrutura do concreto;
- Incentivar a incorporação do RPP em concreto devido a importância da sustentabilidade, diminuindo os impactos ambientais, através da análise de emissão de CO₂.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Concreto

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil devido à sua larga aplicação em elementos estruturais e não estruturais, podendo ter suas propriedades manipuladas no processo de dosagem para melhor adequação na sua destinação. O concreto pode ser definido como a mistura de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, podendo ou não conter adições e/ou aditivos.

Os agregados correspondem entre 60 e 80% do volume total do concreto, em que são componentes inertes que se apresentam como partículas e funcionam como material de enchimento, além de possuir ótima resistência (SOUZA, 2007). Segundo Silva (2005) e Souza (2007), os agregados são responsáveis pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto, pois essas propriedades dependem da densidade e resistência deles.

Segundo Neville (1994), a distribuição granulométrica do agregado influencia na quantidade de água necessária para molhar todos os sólidos, na trabalhabilidade, na densidade de massa e na tendência de segregação. Carneiro e Cincotto (1999) afirmam que, além das alterações do concreto no estado fresco, os agregados podem influenciar na resistência mecânica, permeabilidade e deformação.

Outro componente do concreto, o cimento é formado pela mistura do clínquer, que é oriundo da mistura do calcário e argila devidamente calcinados e moídos; e, gesso com a função de controlar o tempo de pega, evitando o endurecimento rápido da pasta de cimento. Pode, ainda, conter adições minerais em diferentes teores para a formação dos mais diversos tipos de cimento que são comercializados.

O clínquer é composto por quatro fases principais denominadas de alita (C_3S), belita (C_2S), aluminato (C_3A) e ferroaluminato (C_4AF) e em outras fases menores como óxidos de cálcio, óxidos de ferros, entre outros. Os teores de C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF no volume do clínquer são 50% a 70%, 15% a 30%, 5% a 10% e 5% a 15%, respectivamente (TAYLOR, 1990).

O processo de hidratação do cimento Portland pode ser resumido pela reação da água com os silicatos e aluminatos presentes no cimento anidro, onde o enrijecimento da pasta é caracterizado pela hidratação dos aluminatos e o ganho de resistência pelos silicatos (TAYLOR, 1990; METHA e MONTEIRO, 1994).

No processo de hidratação dos aluminatos, o C_3A e o C_4AF reagem com a água produzindo praticamente os mesmos compostos, na presença de sulfato. Os produtos da hidratação formados são os trissulfoaluminatos de cálcio hidratados (etringita) e os monossulfoaluminatos de cálcio hidratados (AFm). Segundo Metha e Monteiro (1994), os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 15 a 20% do volume dos sólidos da pasta hidratada.

Na hidratação dos silicatos, o C_3S e C_2S reagem com a água, tendo como produtos de hidratação o silicato de cálcio hidratado (CSH) e hidróxido de cálcio (CH). O CSH é responsável pela resistência mecânica da pasta e se apresenta como fibras pouco cristalinas. O CH contribui pouco para resistência mecânica devido à baixa superfície específica, que lhe promove uma baixa adesão, sendo assim, facilmente carregado pela água. Entretanto, o hidróxido de cálcio promove a alcalinidade do meio, sendo responsável pela passivação das armaduras e se apresenta como cristais prismáticos. O CSH e CH ocupam, respectivamente, de 50 a 60% e 20 a 25% do volume dos sólidos da pasta hidratada (METHA e MONTEIRO, 1994).

2.1.1 Propriedade do concreto no estado fresco

Neste subitem serão apresentadas as propriedades do concreto no estado fresco, que são a trabalhabilidade, consistência, coesão e exsudação.

Segundo Souza (2007), a trabalhabilidade engloba as demais propriedades, consistência, coesão e exsudação; porém, tratá-las individualmente é indicado, pois elas representam características importantes para o concreto no estado fresco.

A trabalhabilidade pode ser entendida como a possibilidade de manipular o concreto no estado fresco, sem que haja perda de sua homogeneidade (PETRUCCI, 1978; ANDRIOLO, 1984; METHA e MONTEIRO, 1994). De acordo com Souza (2007), a trabalhabilidade não é apenas característica inerente ao concreto, como observado na consistência, engloba também as considerações acerca da obra, como: sua natureza e métodos de execução adotados. Com isso, um concreto pode ser adequado a uma obra e a outra não.

A consistência é a propriedade que representa o grau de umidade do concreto, estreitamente relacionado com o grau de plasticidade da massa. A consistência é um dos principais fatores que influencia a trabalhabilidade e depende principalmente da quantidade de água da mistura. Quanto maior a quantidade de água, a mistura se

torna mais mole, plástica e trabalhável (GIAMMUSSO, 1992). Para determinar a consistência do concreto, utiliza-se o método do abatimento do tronco de cone – *Slump Test*, conforme descrito na NBR NM 67 (ABNT, 1998).

A coesão é a propriedade em que o concreto permanece misturado, ou seja, seus componentes não se separam (GIAMMUSSO, 1992). Segundo Neville (1994), a falta de coesão no concreto pode ocasionar a segregação, que é a separação dos componentes em uma mistura heterogênea. No concreto, isso pode ser evitado escolhendo uma granulometria adequada e tendo cuidado no manuseio.

Por fim, a exsudação é uma forma de segregação, em que os sólidos em suspensão tendem a se sedimentar devido à ação da força da gravidade e, conseqüentemente, o aparecendo de água na superfície, após o concreto ter sido lançado e adensado, antes de ocorrer sua pega (METHA e MONTEIRO, 1994).

2.1.2 Propriedade do concreto no estado endurecido

No estado endurecido, os concretos têm diversas propriedades, em que no trabalho em questão, as propriedades analisadas foram a resistência mecânica; capilaridade e absorção de água; resistência ao ataque ácido (acético, clorídrico e sulfúrico); carbonatação e resistividade elétrica.

A resistência mecânica é a medida da tensão necessária para romper o material. O concreto é o material mais adequado para resistir aos esforços de compressão em projetos de estruturas de construção civil. A resistência à compressão do concreto está atrelada ao processo de hidratação do cimento. Como esse processo é lento, os ensaios para determinação da resistência à compressão dos concretos são realizados na idade de 28 dias, sendo o concreto curado em condições específicas de temperatura e umidade. A resistência à tração e à flexão do concreto são da ordem de 10 e 15%, respectivamente, da resistência à compressão (METHA e MONTEIRO, 1994). No Brasil, utiliza-se a NBR 5739 (ABNT, 2007) para o ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto.

O concreto, devido à sua constituição possui poros, pois é impossível preencher todos os vazios dos agregados com uma pasta de cimento (SOUZA, 2007). De acordo com Petrucci (1978), a porosidade do concreto está associada as seguintes razões: quantidade de água maior que o necessário para hidratar o cimento, ocasionando vazios pela evaporação da água; combinação química, ocorrendo

diminuição dos volumes absolutos de cimento e água que entram em reação; e processo de mistura do concreto, onde há incorporação de ar na massa. Diamond (2004) ressalta que a interconexão dos vazios de água e ar torna o concreto permeável. Com isso, a estrutura de poros, juntamente com outros fatores, influencia diretamente na durabilidade do concreto.

A durabilidade do concreto pode ser definida como a sua capacidade de resistir a ações de intempéries, ataque químico, abrasão e outras condições em serviços. Em virtude desses fatores, sua microestrutura e propriedades mudam com o tempo. Todavia, o material atinge o final de sua vida útil quando suas propriedades deterioram até o ponto que sua utilização se torna inviável (METHA e MONTEIRO, 2014).

A permeabilidade é a propriedade do concreto que permite a passagem de um fluido no seu interior. Já a absorção é a propriedade que o concreto possui em reter água nos poros e condutos capilares (ANDRIOLO, 1984). Utilizam-se as NBR 9778 (2005) e NBR 9779 (2012) para avaliar essas propriedades; a primeira, referente à absorção total de água e, a segunda, à absorção da água por capilaridade.

A resistência ao ataque ácido é um parâmetro que visa analisar como se comporta o concreto perante agentes agressivos. O mecanismo de deterioração do concreto por ácido acético acontece da seguinte maneira: a solução de ácido acético percola para dentro da matriz de cimento e reduz o pH da solução dos poros, que favorece o início da corrosão das armaduras no interior do concreto (OUESLATI e DUCHESNE, 2012). Além disso, Chatveera e Lertwattanakul (2014) destacam que quando a alcalinidade cai abaixo de 12, o hidróxido de cálcio dissolvido contribui para uma via conectada de capilares porosos, permitindo que os íons de ácido penetrem mais profundamente na estrutura interna, diminuindo a resistência material.

O mecanismo de deterioração do ácido clorídrico ocorre de modo semelhante ao anterior, no tocante a diminuição do pH. A solução de ácido clorídrico penetra nos poros do material, em que ocorre a neutralização progressiva da natureza alcalina da matriz de cimento através da decomposição de produtos de hidratação, hidróxido de cálcio e CSH, perdendo massa e reduzindo a resistência, formando cloreto de cálcio solúvel e água (DONATELLO, PALOMO e FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2013).

O ataque através do ácido sulfúrico acontece mediante a sua penetração no concreto, onde reage primeiro com o hidróxido de cálcio, silicato de cálcio (não hidratado) e silicato de cálcio hidratado no concreto formando gesso. Esse processo pode diminuir o desempenho do concreto, já que o gesso não contribui para a

resistência. Em seguida, o gesso reage com o hidrato de aluminato de cálcio para formar etringita (BEDDOE e DORNER, 2005). Logo, o concreto sofre mais degradação, visto que, a etringita é instável no ambiente de ácido sulfúrico (XIAO *et al.*, 2016), comprometendo sua durabilidade.

Como já destacado, outro fenômeno que infere na durabilidade do concreto é o processo de carbonatação, que ocorre devido ao gradiente de concentração entre o concreto e o ambiente externo, que leva à difusão do dióxido de carbono no concreto. O dióxido de carbono reage com as fases de hidratação do cimento, resultando em uma redução da alcalinidade do concreto (SHAH e BISHNOI, 2018; RIBEIRO, SANTOS e GONÇALVES, 2018). Com alcalinidade reduzida, ocorre a despassivação da armadura do concreto, tornando-o suscetível à corrosão.

Por fim, a resistividade elétrica está relacionada ao movimento de íons no concreto. Logo, está relacionada com a microestrutura do concreto e a condutividade da solução dos poros (RAMEZANIANPOUR e JOVEIN, 2012). A resistividade elétrica normalmente aumenta quando o concreto possui menor porosidade e menores tamanhos de poro, porque o fluxo de íons através dos poros é dificultado. Outro fator importante são os íons de hidroxila e de metais alcalinos, pois eles são os principais íons que transportam carga (SAFIUDDIN *et al.*, 2010). Além disso, a resistividade elétrica serve também como um indicador sobre a probabilidade de corrosão em estruturas de concreto. O CEB-192 (*Comité Euro-International du Béton*) indicou uma classificação para uma taxa provável de corrosão em função da resistividade do concreto, conforme Tabela 1 (METHA e MONTEIRO, 2014).

Tabela 1 - Estimativa da provável taxa de corrosão em função da resistividade elétrica.

| Resistividade do concreto (KΩ.cm) | Taxa provável de corrosão |
|--|----------------------------------|
| > 20 | Desprezível |
| 10 a 20 | Baixa |
| 5 a 10 | Alta |
| < 5 | Muito alta |

Fonte: Metha e Monteiro (2014).

2.2 Aditivo superplastificante

Os aditivos são produtos químicos utilizados em concretos com o intuito de alterar suas propriedades para uma determinada finalidade. Segundo a NBR 11768

(ABNT, 2011), define aditivos para concreto como produto adicionado na preparação com teor menor ou igual a 5% da massa do cimento, com o objetivo de modificar as propriedades no estado fresco e/ou endurecido.

Os aditivos superplastificantes (SP) são formados de tensoativos aniônicos de cadeia longa e massa molecular elevada. Quando adsorvido pelas partículas de cimento, o tensoativo confere uma forte carga negativa, a qual auxilia a reduzir consideravelmente a tensão superficial da água circundante e aumentar acentuadamente a fluidez do sistema (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

De acordo com NBR 11768 (ABNT, 2011), o aditivo superplastificante (SP) tem como característica manter a consistência do concreto reduzindo a quantidade de água, ou que, sem alterar a quantidade de água aumenta o abatimento do concreto, ou ainda, produz esses dois efeitos. Segundo Souza (2007), o SP pode reduzir 20% ou mais da quantidade de água, dependendo do teor de aditivo, para manter uma mesma consistência.

2.3 Adições

A incorporação de adições minerais em concreto se tornou uma tendência, essencialmente, devido aos seguintes fatores: aumento considerável de resíduos gerados por processos industriais; leis ambientais para proteção do meio ambiente; necessidade de uma destinação adequada para os resíduos, principalmente, no tocante a reutilização dos mesmos ao invés de descartá-los; e a diminuição do consumo de cimento, pois em sua produção há uma grande liberação de CO₂ na atmosfera, que é prejudicial ao meio ambiente. Por fim, com a junção desses fatores têm-se uma diminuição da poluição do meio ambiente e uma economia na produção dos concretos.

De acordo com Dal Molin (2011), as adições minerais podem ser classificadas, conforme sua ação físico-química de três modos:

- Fíler: adição mineral finamente dividida, sem atividade química, compreendendo a ação física como empacotamento granulométrico e pontos de nucleação para hidratação dos grãos de cimento. Exemplo: calcário, pó de quartzo, pó de pedra;
- Material cimentante: adição mineral que não precisa da Portlandita presente no cimento para formar produtos cimentantes, como o CSH. Seu processo de auto

hidratação é lento e os produtos cimentantes é baixo para poder aplicá-lo como material para fins estruturais. Exemplo: escória granulada de alto forno;

- Material pozolânico: adição mineral silicoso ou sílico-aluminoso, que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, porém quando finamente dividido e na presença de água reage com a Portlandita formando compostos cimentantes. Exemplo: cinza volante com baixo teor de cálcio, pozolana natural, sílica ativa, cinza de casca de arroz e metacaulim.

2.3.1 Materiais inertes ou quase inertes (Fíler)

O fíler é um material bastante usado em materiais cimentícios em razão de sua contribuição para o melhoramento da compacidade do material, podendo aumentar a resistência mecânica e durabilidade. Segundo Dal Molin (2011), o fíler possui diâmetro médio próximo ao do cimento, que devido à sua ação física, melhora algumas propriedades de argamassas e concretos, em que se pode destacar: trabalhabilidade (a depender de sua área superficial específica e outros fenômenos de superfície), massa específica, permeabilidade e tendência de fissuração.

Além da ação física, melhorando a distribuição de partículas, aumentando pontos de nucleação de CSH e diminuindo os vazios, o fíler pode apresentar alguma reatividade. Taylor (1990) destaca que aproximadamente 3% do calcário adicionado como fíler reage quimicamente durante a hidratação do cimento acelerando a hidratação do C_3S . Além disso, formação de diferentes fases como o CSH carbonatado, etringita carbonatada, e estabilização da etringita em função da formação de fases monocarboaluminato e hemicarboaluminato têm sido relatadas na literatura quando da presença do fíler calcário nos sistemas cimentícios (WANG *et al.*, 2018).

2.3.2 Materiais pozolânicos

Os materiais pozolânicos são aqueles que reagem com o hidróxido de cálcio na presença de água formando silicato de cálcio hidratado, produto menor que o CH. De acordo com Metha e Monteiro (2014), a reação pozolânica é do tipo ácido-base, pois a interação ocorre entre os óxidos (ácido) do material pozolânico com a

portlantida (base). No entanto, é fundamental que os óxidos de sílica e alumina estejam em seu estado amorfo, isto é, instáveis para reagirem com o CH.

Além das questões de reaproveitamento de materiais, dado que, as adições pozolânicas são, na maioria dos casos, subprodutos industriais, elas geram benefícios ao concreto como: a) diminuição do calor de hidratação (MASSAZZA, 1998; SANTOS, 2006; MEHTA e MONTEIRO, 2014; ISAIA, 2011) e, conseqüentemente, redução da fissuração térmica; b) maior resistência ao ataque ácido (GUEDERT, 1989; NEVILLE, 1994; MEHTA e MONTEIRO, 2014), visto que, a reação pozolânica ocasiona uma diminuição de CH e, como resultado, menor lixiviação; c) maior durabilidade e aumento da resistência mecânica (GUEDERT, 1989; NEVILLE, 1994; MASSAZZA, 1998; SANTOS, 2006; ISAIA, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014), visto que, ocorre um refinamento dos poros e fortalecimento da zona de transição, aumentando assim a resistência mecânica e a durabilidade (aumento da impermeabilidade); e d) a possibilidade de, em argamassa ou concreto, substituir uma parte do agregado miúdo; além de poder ser utilizado como componente do cimento Portland, substituindo até 50% do clínquer (VASCONCELOS, 2013).

Entretanto, as adições pozolânicas possuem algumas desvantagens, como, em alguns casos, a exigência da utilização de aditivos redutores de água devido ao aumento da demanda de água nas misturas; e, cuidados na cura, para que a reação pozolânica aconteça de forma completa (SANTOS, 2006).

Com relação a sua classificação, a NBR 12653 (2014) determina três classes: N, C e E. A classe N corresponde as pozolanas naturais e artificiais, como materiais vulcânicos de caráter petrográficos ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. A classe C engloba a cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas. Já a classe E é compreendida por qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores.

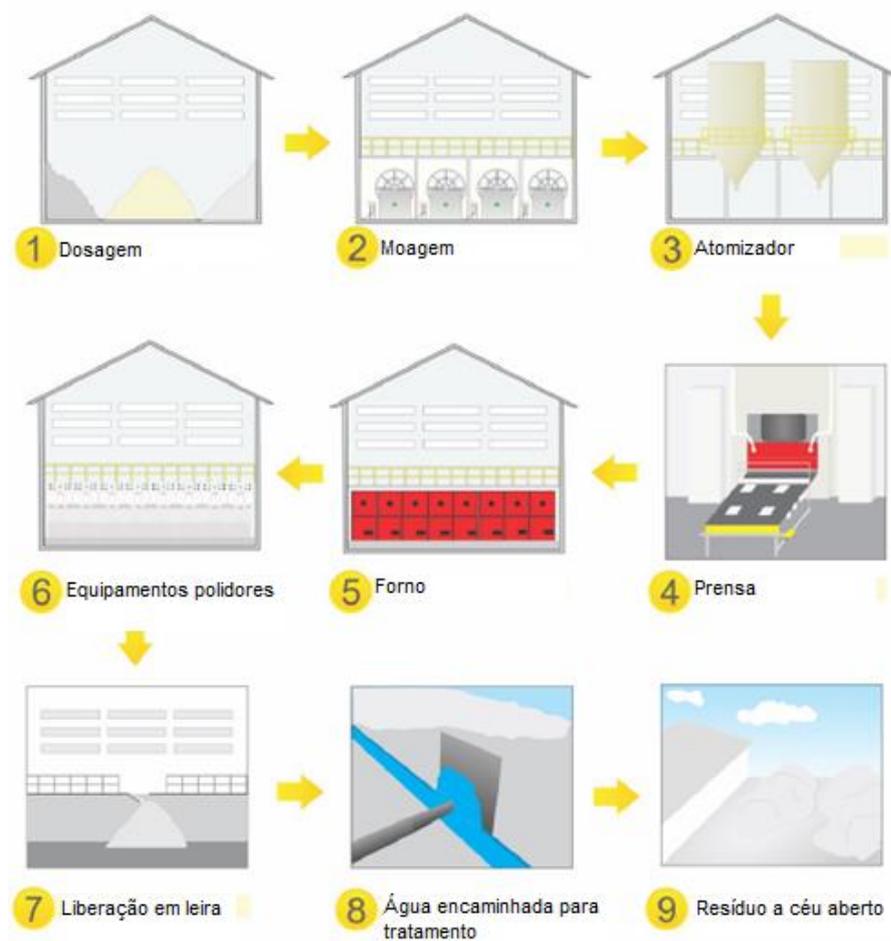
2.4 Resíduo do polimento do porcelanato

O resíduo do polimento do porcelanato (RPP) pode ser definido como uma mistura do resíduo cerâmico do porcelanato, provindo da etapa de polimento, com o material abrasivo utilizado para polir o porcelanato, que desprende devido a esse processo. O RPP apresenta-se como um pó fino, branco e umedecido.

Comercialmente são vendidos dois tipos de porcelanatos, o rústico e o polido, ambos possuindo algumas variações, como: rústico-polido, esmaltado, natural, acetinado, antiderrapante etc. O porcelanato polido se destaca pelo seu alto consumo. É esse tipo de porcelanato que possui a etapa de polimento que gera o resíduo do polimento do porcelanato (LIMA, 2015).

As etapas desde a dosagem das matérias-primas até a geração do resíduo do polimento do porcelanato (RPP) são apresentadas no Fluxograma 1.

Fluxograma 1 - Processo produtivo do resíduo do polimento do porcelanato.



Fonte: O Autor (2019).

Nota: Adaptado de Sousa Júnior (2016).

A primeira etapa é a dosagem da massa do porcelanato, em que segundo Souza (2007), essa massa é composta basicamente pela mistura de argilas, feldspatos, areias feldspáticas, caulins e, quando necessário, filitos e aditivos.

Em seguida, ocorre o processo de moagem, etapa 2 (Fluxograma 1), que tem como objetivo conferir uma granulometria adequada ao material para garantir

condições de compactação ideais (SOUSA JÚNIOR, 2016). Segundo Araujo (2016), a moagem é feita em um moinho de bolas e a barbotina não recebe coloração adicional. Antes de ser encaminhada a etapa seguinte, a massa é peneirada para reter o material grosso e obter um material homogêneo.

A atomização, etapa 3 (Fluxograma 1), é uma operação que consiste em desumidificar a barbotina. Esse processo é realizado por um atomizador, também conhecido como *spray dryer*, em que ocorre a injeção da barbotina a alta pressão, onde entra em contato com o ar a uma temperatura que varia de 500 a 600°C (MORAES, 2007).

Na etapa da prensagem, etapa 4 (Fluxograma 1), busca-se a conformação e redução da porosidade interna da peça. A pressão específica de compactação utilizada varia de 400 kgf/cm² a 500 kgf/cm², sendo ela aplicada uniformemente para evitar deformações (ARAUJO, 2016).

Em seguida, as peças são secadas a fim de reduzir o teor de umidade nas peças, para que não ocorra problemas na etapa de queima do porcelanato (SOUZA, 2007). Sem essa etapa, possivelmente, ocorreria a formação abrupta de bolhas de vapor na etapa de queima e, conseqüentemente, defeitos nas peças. Após a secagem, as peças adquirem uma maior resistência, porém ainda podem ser quebradas facilmente (ARAUJO, 2016).

Na etapa de queima, etapa 5 (Fluxograma 1), ocorre a densificação via fase líquida, reduzindo o máximo possível a porosidade das peças. Ainda nessa etapa, acontece a sinterização da massa cerâmica, proporcionando valores de absorção de água quase nulos e estabilidade dimensional (MORAES, 2007).

A etapa de polimento, etapa 6 (Fluxograma 1), consiste na utilização de um equipamento dotado de várias cabeças compostas de materiais abrasivos (Figura 1), que em contato com as peças de porcelanato em alta rotação, velocidade controlada e na presença de água, executam o polimento. Na medida que a peça vai passando pelo equipamento, o material abrasivo utilizado apresenta gradativamente uma granulometria mais fina, até se conseguir o resultado de polimento desejado, ou seja, o brilho superficial (BITTENCOURT e BENINCÁ, 2002).

Figura 1 - Equipamento polidor com 6 cabeças polidoras (tijolos abrasivos).



Fonte: Souza (2007).

Segundo Breitenbach (2013), na etapa de polimento é utilizado uma grande quantidade de água, onde em uma unidade de polimento é usada aproximadamente 4000 L; com isso, há necessidade de reaproveitamento, em que é realizado por meio da recirculação da água em circuito fechado. A importância da água no processo de polimento é diminuir o atrito entre os abrasivos e a peça, refrigerando o local e removendo os resíduos que poderiam ficar sobre as peças, causando riscos e arranhões.

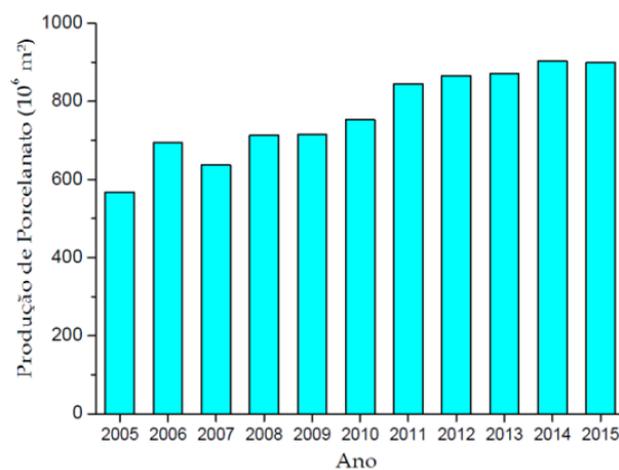
Com isso, a lama do resíduo do polimento do porcelanato (RPP), gerada na etapa de polimento, é direcionada por tubos para o exterior do galpão de produção. Alí, é comprimida em uma prensa de modo que o pó úmido forme placas retangulares que são liberadas em leiras, etapa 7 (Fluxograma 1). Após a lama ser comprimida, a água é encaminhada para tratamento, etapa 8 (Fluxograma 1), através de tubos e valas. Por fim, as placas de RPP liberadas em leiras são transportadas para terrenos a céu aberto, etapa 9 (Fluxograma 1), em que são secadas ao ar (ARAUJO, 2016). Na maioria dos casos, devido à grande geração de RPP, as empresas fazem a estocagem do resíduo em seu pátio (Figura 2) para depois serem levados a um local apropriado, gerando custo.

Figura 2 - Estocagem do RPP.



Fonte: Souza (2007).

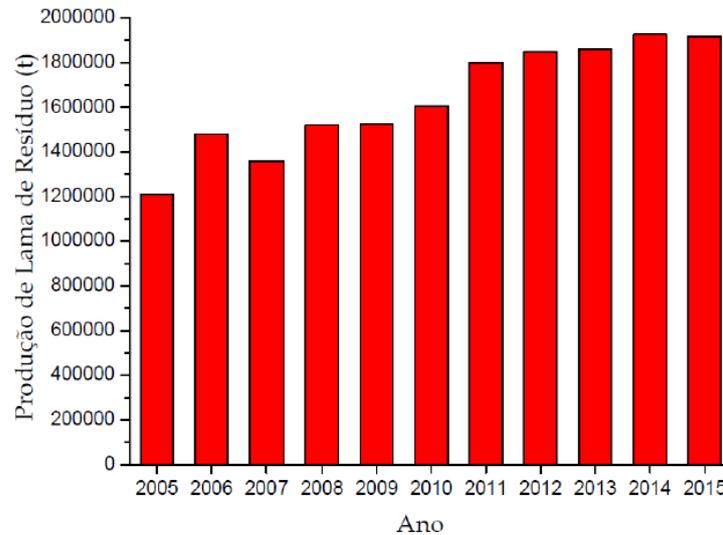
Ao longo do tempo, a indústria de revestimento cerâmico vem aumentando a produção de porcelanato. Em 1996, existia uma única empresa de porcelanato no Brasil; diferente de hoje, que existem várias indústrias especializadas na produção do porcelanato (BERNARDIN *et al.*, 2007). De acordo com essa afirmação, é apresentado, no Gráfico 1, a produção de porcelanato em área (m²) de 2005 até 2015.

Gráfico 1 - Produção de porcelanato (m²) de 2005 a 2015.

Fonte: Sousa Júnior (2016).

Conforme o Gráfico 1, observa-se que, ao longo dos anos, a produção do porcelanato tende a crescer. Comparando-se os anos de 2005 e 2015 houve um aumento na produção de aproximadamente 55,17%. Se há o aumento de produção do porcelanato, conseqüentemente, há o aumento do RPP nas mesmas proporções, conforme o Gráfico 2. Demonstrando assim, a grande geração desse resíduo e necessidade de um destino ecologicamente correto.

Gráfico 2 - Produção da lama do RPP (t) de 2005 até 2015.



Fonte: Sousa Júnior (2016).

2.4.1 Características físico/químicas do RPP

Como dito anteriormente, o resíduo do polimento do porcelanato (RPP) é constituído do resíduo da cerâmica e do abrasivo, logo, suas características advêm desses materiais.

Com relação à sua composição química, destacam-se três elementos em maiores quantidades, sendo, em ordem decrescente: a sílica, a alumina e o óxido de magnésio (SILVA, 2005; SOUZA, 2007; SANTOS, 2008; JACOBY e PELISSER, 2015; STEINER, BERNARDIN e PELISSER, 2015; NASCIMENTO, 2016). Para analisar a composição química do RPP, Bernardin *et al.* (2007) realizou a espectrometria de fluorescência de Raios-X (FRX) do resíduo do polimento da massa porcelânica e do abrasivo separadamente, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Análise química dos resíduos polimento e abrasivo separadamente.

| Resíduo | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO ₃ | TiO ₂ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | P.F. |
|-----------|------------------|--------------------------------|------------------|------------------|-----|------|------------------|-------------------|------|
| Polimento | 59,5 | 17,3 | 0,7 | 0,3 | 1,6 | 5,3 | 2,8 | 3,6 | 5,6 |
| Abrasivo | 10,5 | 1,6 | 1,6 | 0,1 | 4,1 | 34,8 | 0,1 | 6,3 | 40,2 |

Fonte: Bernardin *et al.* (2007).

Já Santos (2008) realizou a mesma análise de Bernardin *et al.* (2007), porém com relação ao RPP; ou seja, com a mistura do resíduo do porcelanato e do abrasivo, obtendo os resultados descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise química do RPP.

| Fase | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | ZrO ₂ | CaO | SO ₃ | P ₂ O ₅ | Outros |
|----------------|------------------|--------------------------------|--------|------------------|------------------|-------|-----------------|-------------------------------|--------|
| Percentual (%) | 59,533 | 18,989 | 10,953 | 3,050 | 2,260 | 1,911 | 1,533 | 1,010 | 0,841 |

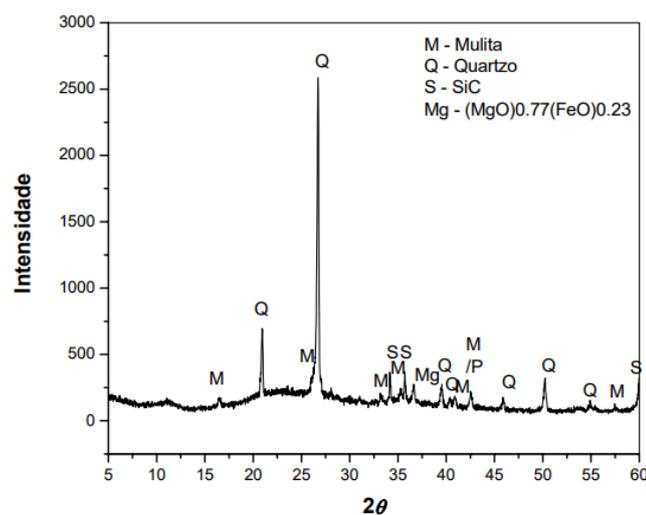
Fonte: Santos (2008).

Na Tabela 3, pode-se observar que os elementos em maiores concentrações no RPP são a sílica, a alumina e o óxido de magnésio. Com base na Tabela 2, observa-se que o abrasivo contém um grande teor de óxido de magnésio, visto que, segundo Bernardin *et al.* (2007), o abrasivo é composto pelo cimento cloro-magnésiano. O RPP costuma ser composto por uma considerável concentração de óxido de magnésio; oriundo principalmente do abrasivo usado no processo.

Steiner (2014) verificou, a partir da análise química, que o RPP pode ser classificado como material pozolânico pela NBR 12653 (2012), pois a respectiva norma determina um percentual mínimo de 70% na soma dos percentuais de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃, e, em sua pesquisa, Steiner (2014) obteve 89,1%. Necessitando, além disso, avaliar se o material possui reatividade.

Na verificação das fases cristalina do RPP, Marques *et al.* (2007) observaram a presença mulita, quartzo, carbeto de silício (SiC) e o periclase por difração de Raios-X (DRX), Gráfico 3.

Gráfico 3 - Padrão de difração de raios X do resíduo do polimento de porcelanato.



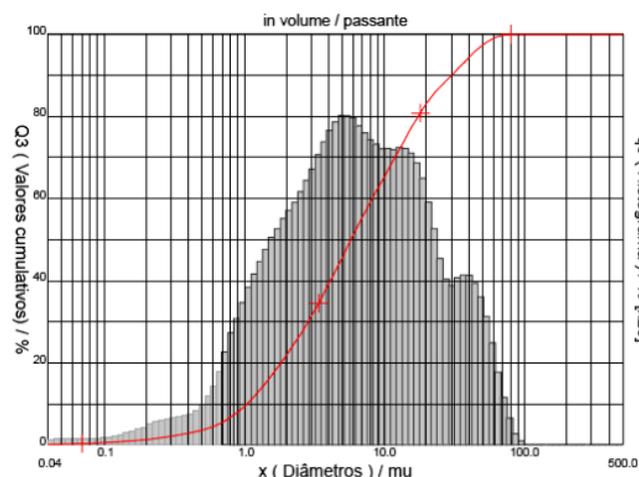
Fonte: Marques *et al.* (2007).

O autor ainda destaca que a presença do carbeto de silício e o periclase advêm do abrasivo, enquanto a mulita e o quartzo são oriundos do porcelanato. Concluindo

que no FRX do RPP, a presença da sílica é decorrente do porcelanato e do SiC do abrasivo, sendo a alumina associada ao porcelanato, e o óxido de magnésio, em sua maior quantidade, oriundo do abrasivo.

A distribuição do tamanho das partículas do RPP pode ser observada no Gráfico 4, em que Marques *et al.* (2007) determinou o diâmetro médio do RPP, que foi de 11,1 μm , e D_{10} , D_{50} e D_{90} de aproximadamente 1, 6 e 30 μm , respectivamente. Além disso, o autor verificou que o resíduo possui uma larga distribuição de tamanho de partículas, porém com dimensões máximas parecidas com os materiais fundentes e de enchimento (feldspato e quartzo) comerciais, normalmente comercializados como passante na malha 200 (74 μm). Apenas uma quantidade inferior a 0,5% do RPP apresentou dimensões acima de 74 μm .

Gráfico 4 - Distribuição do tamanho de partículas do resíduo do polimento de porcelanato.

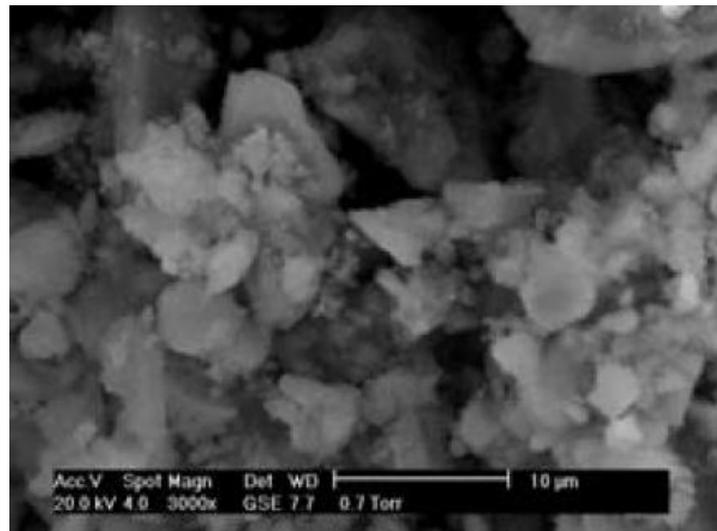


Fonte: Marques *et al.* (2007).

Através da observação realizada na microscopia eletrônica de varredura (MEV) em uma amostra do RPP, Santos (2008) constatou que as partículas do resíduo são irregulares e angulares, conforme pode ser observado na Figura 3, que ocasionam maior dificuldade no rolamento entre as partículas.

Silva (2005) determinou a massa específica do RPP e obteve um resultado de 2,48 g/cm^3 . Além disso, determinou a área superficial específica pelo método de Brunauer-Emmett-Teller (BET) sendo de 15,74 m^2/g .

Figura 3 - Micrografia do RPP - elétrons secundários.



Fonte: Santos (2008).

2.4.2 Influência da incorporação do RPP em matrizes de cimento Portland

Diversas pesquisas sobre a utilização de resíduo do polimento do porcelanato (RPP) em materiais cimentícios comprovaram que esse resíduo contribui significativamente para a melhoria desses materiais, além das questões econômicas e ambientais. Com isso, a seguir serão apresentados dados obtidos dessas pesquisas que sustenta a ideia de incorporar o RPP em concreto.

Com relação ao estado fresco em argamassas, observou-se que para uma mesma consistência, a demanda de água aumentava à medida que incorporava o RPP. Segundo alguns autores, esse efeito está relacionado à alta área superficial específica e morfologia irregular (SANTOS, 2008; WANG *et al.*, 2011; BREITENBACH *et al.*, 2017). No trabalho de Wang *et al.* (2011), o cimento foi substituído por RPP nos teores de 0%, 5%, 10%, 20% e 30% e foram necessários, respectivamente, 122,6 g, 127,3 g, 129,5 g, 139,3 g e 143,9 g de água para obter a mesma consistência.

Além disso, o RPP contribui para uma melhor ligação entre a pasta e o agregado, atuando como um agente capaz de aumentar a coesão da argamassa (SANTOS, 2008; BREITENBACH *et al.*, 2017). Breitenbach *et al.* (2017) verificou que argamassas com RPP possuem maior retenção de água, sendo importante para determinadas condições climáticas e aplicações, e menor teor de ar incorporado, devido a um melhor empacotamento.

Com relação ao concreto, foi observado também perda de trabalhabilidade, onde houve diminuição no valor do abatimento (SILVA, 2005; SOUZA, 2007). Silva (2005) ressalta que esse comportamento é devido a área superficial específica e partículas finas do RPP que atuam como uma barreira física para o movimento ascendente da água, promovendo um aumento na consistência e menor exsudação. De acordo com Souza (2007), só foi possível avaliar concreto com teor de 50% de adição de RPP, quando foi utilizado aditivo superplastificante (SP), pois diminuiu consideravelmente a fluidez.

No tocante ao efeito fíler, pesquisas com pasta e argamassa identificaram aumento de resistência à compressão devido ao efeito fíler e a nucleação heterogênea causada pelas partículas finas do RPP durante a hidratação do cimento (WANG e TIAN, 2009; PELISSER, STEINER e BERNANDIN, 2012; STEINER, BERNARDIN e PELISSER, 2015; JACOBY e PELISSER, 2015; BREITENBACH *et al.*, 2017). Além disso, foi observado que a granulometria descontínua entre o RPP e o cimento contribuíram para a redução da porosidade (WANG e TIAN, 2009; WANG *et al.*, 2011; YUNHONG *et al.*, 2014; JACOBY e PELISSER, 2015).

Em concreto, também, foi observado aumento de resistência mecânica devido ao efeito fíler à medida que aumentava a porcentagem de RPP. Silva (2005) observou aos 7 dias que os concretos com adição de RPP nos teores de 0%, 10% e 20% com relação a massa de cimento apresentaram, respectivamente, resistência à compressão de 27,78 MPa, 29,95 MPa e 31,61 MPa. Resultados apresentando a mesma tendência foi observado no trabalho de Souza (2007), onde o concreto de referência obteve uma resistência de 16,34 MPa e o concreto com 50% de adição atingiu 28,40 MPa.

Breitenbach *et al.* (2017) observaram, em sua pesquisa com argamassa, que para até 20% de incorporação do RPP, aumentou-se a absorção de água por capilaridade, tendo os traços com 0%, 10% e 20% valores de 0,25 g/cm², 0,43 g/cm² e 0,53 g/cm², respectivamente. Esse fato foi explicado em função do RPP possuir menor diâmetro das partículas, permitindo assim a formação de poros com diâmetros menores e, possivelmente, a ocorrência de conectividade entre eles. Em seguida, aumentando-se a quantidade de RPP na mistura (30% de RPP), a absorção de água por capilaridade diminuiu para 0,27 g/cm². Com relação ao concreto, também foi observado diminuição da absorção de água nos traços com RPP (SILVA, 2005; SOUZA, 2007; PACHECO-TORGAL e JALALI, 2010).

O efeito pozolânico do RPP foi um fator presente em vários trabalhos com pasta e argamassa (WANG e TIAN, 2009; WANG *et al.*, 2011; PELISSER, STEINER e BERNARDIN, 2012; YUNHONG *et al.*, 2014; STEINER, BERNARDIN e PELISSER, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Jacoby e Pelisser (2015) constataram menores teores de hidróxido de cálcio (CH) em pastas cimentícias com RPP com relação ao de referência (0% de RPP), devido à reação pozolânica do resíduo. Dados, aos 84 dias de cura, dos traços com 0%, 10% e 20% de RPP apresentaram massa de CH de, respectivamente, 11,7%, 9,0% e 7,2%. Comportamento semelhante também foram obtidos por Pelisser, Steiner e Bernardin (2012) e Steiner, Bernardin e Pelisser (2015).

Além disso, verificou-se que o RPP contribui para a diminuição da retração autógena, devido as reações lentas da atividade pozolânica (STEINER, BERNARDIN e PELISSER, 2015), e aumento da resistência à compressão em idades avançadas (WANG e TIAN, 2009; PELISSER, STEINER e BERNARDIN, 2012; STEINER, BERNARDIN e PELISSER, 2015; JACOBY e PELISSER, 2015).

Em se tratando da incorporação de RPP em concreto, Souza (2007), Pacheco-Torgal e Jalali (2010), Matos *et al.* (2018b) e Medeiros *et al.* (2018) constataram que o RPP tem um efeito pozolânico, em que foram obtidos aumento de resistência em idades avançadas. Na pesquisa de Souza (2007), aos 90 dias, a resistência à compressão obteve um aumento de 81,20% para o concreto com 40% de adição do RPP com relação ao de referência; já Medeiros *et al.* (2018) obteve um acréscimo de 26,94% para o concreto com 40% de substituição de agregado miúdo por RPP comparando-se com o de referência também aos 90 dias.

Com relação a hidratação do cimento na presença do RPP, foi observado que quanto maior é a substituição do cimento por RPP, menor é o calor de hidratação liberado. Segundo Wang e Tian (2009), traços com 0%, 10% e 30% de substituição de cimento por resíduo do polimento do porcelanato (RPP) e apresentaram, respectivamente, 245,68 J, 234,45 J e 212,74 J.

Comportamento semelhante foi observado por Jacoby e Pelisser (2015), que associaram esse fato a menor quantidade de cimento. Ainda segundo esses autores, analisou-se o calor de hidratação quando mantido fixo a quantidade de cimento e adicionando o RPP. Após a análise, observou-se comportamento inverso de quando ocorre a substituição, pois os traços com 0%, 10% e 20% apresentaram, respectivamente, 0,00215 W/g, 0,00225 W/g e 0,00240 W/g, indicando uma tendência

do RPP reagir com os compostos de hidratação do cimento durante as primeiras horas de endurecimento ou promover um efeito de fíler, formando pontos de nucleação e melhorando a dispersão da matriz de cimento hidratado, contribuindo para o aumento da resistência dos materiais produzidos com RPP. Pelisser, Steiner e Bernardin (2012) também observaram esse mesmo comportamento quando o RPP é apenas adicionado.

No quesito durabilidade, além da porosidade e permeabilidade como já discutido, algumas pesquisas analisaram fatores que poderiam degradar o concreto. Foi verificado que o traço com RPP apresentou uma menor permeabilidade ao oxigênio e menor coeficiente de difusão de íons cloretos, além de menor perda de resistência mecânica quando os concretos com RPP foram expostos a um ensaio de envelhecimento acelerado (PACHECO-TORGAL e JALALI, 2010).

Já Yunhong *et al.* (2014) realizaram ensaios de carbonatação e resistência ao sulfato. Foi observado que a incorporação do RPP aumentou a profundidade de carbonatação, devido à ação pozolânica que consumiu o hidróxido de cálcio, diminuindo o pH. Com relação à resistência ao sulfato, os concretos com RPP possuíram maiores resistências devido à estrutura de poros.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nesse capítulo, será abordado o programa experimental que compreende as seguintes etapas: caracterização dos materiais, dosagem do concreto, produção do concreto, ensaios no estado fresco, ensaios no estado endurecido e indicadores de durabilidade, análise microestrutural e emissão de CO₂.

As etapas do programa experimental realizadas no Laboratório de Construção Civil (LCC) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco/Centro Acadêmico do Agreste (UFPE/CAA) foram:: massa específica e unitária dos agregados, cimento e RPP; granulometria dos agregados; índice de atividade pozolânica do RPP; produção do concreto; ensaios no estado fresco e endurecido; e, indicadores de durabilidade. Os ensaios de resistência ao ataque ácido, análise térmica e cristalográfica do concreto foram realizados no Laboratório de Química (LQ); e, a resistividade elétrica no Laboratório de Física (LF) da UFPE/CAA, em Caruaru – PE.

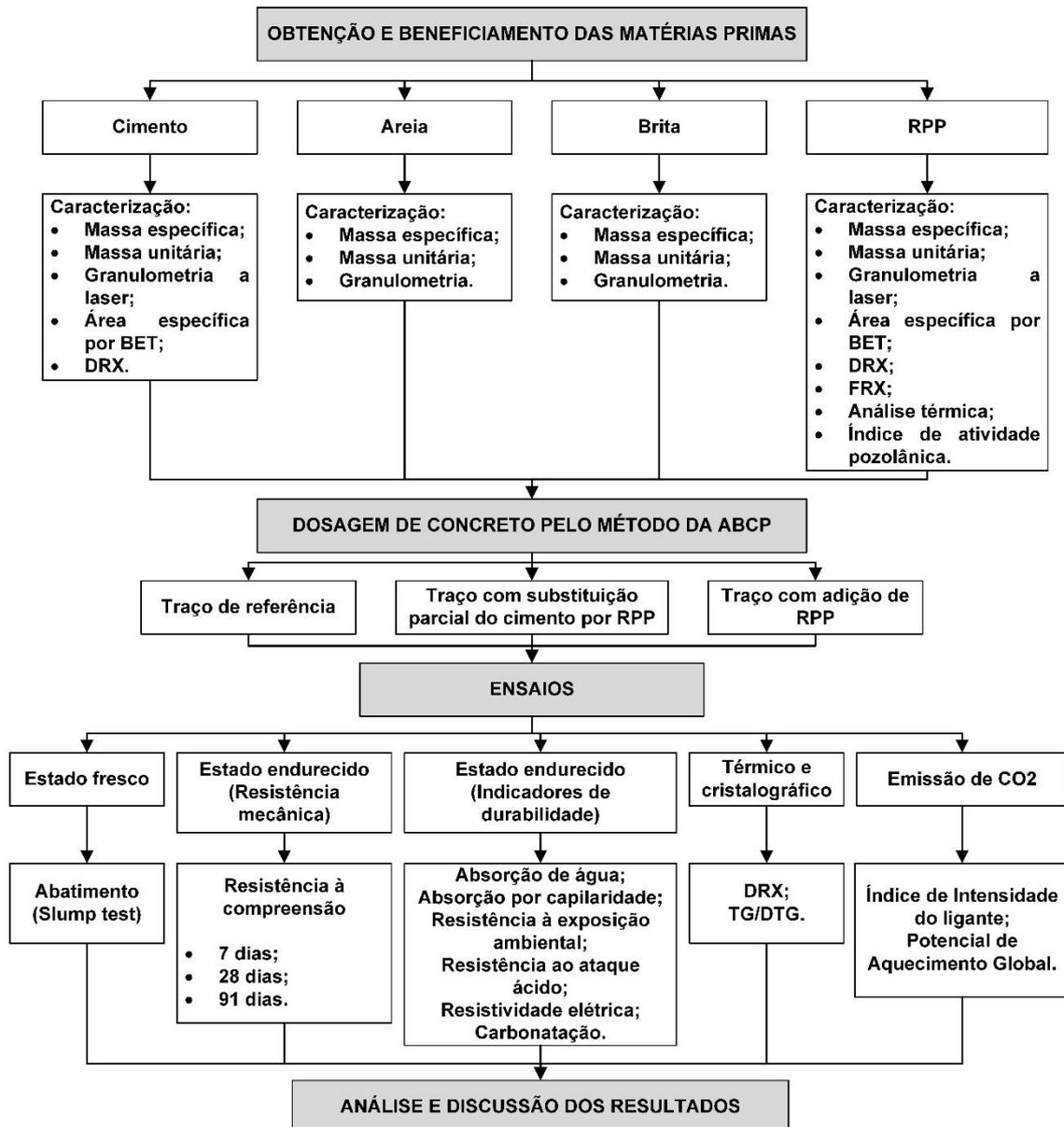
Foram realizadas, também, parte do programa experimental no Laboratório de Nanotecnologia do Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste (CETENE), em Recife – PE, são elas: granulometria a laser, área superficial específica pelo método de BET e difração de Raios-X (DRX) do cimento e RPP.

Por fim, a análise térmica (TG) e a fluorescência de Raios-X (FRX) do resíduo do polimento do porcelanato (RPP) foram realizadas na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em Campina Grande – PB, pelo grupo de pesquisa do PPGECAAM.

O programa experimental adotado foi embasado nas instruções da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através de seus textos normativos (NBR), bem como consultas a artigos científicos.

As etapas do programa experimental encontram-se compiladas no Fluxograma 2.

Fluxograma 2 - Etapas do programa experimental.



Fonte: O Autor (2019).

3.1 Obtenção e beneficiamento dos componentes do concreto

3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI), visto que, esse tipo de cimento possui baixos teores de adição mineral e não é considerado pozolânico. Com isso, pode-se analisar a influência da incorporação do RPP no concreto, sem a interferência de outras adições, que são encontradas em outros tipos de cimento.

O CP V – ARI utilizado foi da marca Mizu, em que sua composição química e características físicas estão apresentadas na Tabela 4, conforme obtido no boletim técnico da empresa.

Tabela 4 - Características e composição do cimento utilizado.

| Características gerais | | | | |
|--|---|---|--|-------------------|
| Designação | Tipo | Massa específica (g/cm ³) | Finura por Blaine (cm ² /g) | |
| C | CP V - ARI | 3,09 | 4,797 | |
| Características químicas | | | | |
| Perda ao fogo (%) | Resíduo insolúvel (%) | SO ₃ (%) | CaO (%) | |
| 4,37 | 1,00 | 2,54 | 1,82 | |
| Propriedades físicas | | | | |
| Retido na malha 0,075 mm (%) | Retido na malha 0,044 mm (%) | Expansibilidade (mm) | Início de pega (min) | Fim de pega (min) |
| 0,22 | 1,97 | 2,00 | 100 | 165 |
| Propriedades mecânicas | | | | |
| Resistência à compressão a 1 dia (MPa) | Resistência à compressão aos 3 dias (MPa) | Resistência à compressão aos 7 dias (MPa) | | |
| 18,30 | 28,30 | 37,00 | | |

Fonte: Mizu (2017)

3.1.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado foi areia média lavada de rio, comumente encontrada e comercializada na região. Adquiriu-se 1 m³ da areia, sendo previamente seca em estufa a uma temperatura de aproximadamente 100°C durante 24 horas. Após a secagem, a areia foi removido as partículas grosseiras indesejadas e acondicionada em tonéis protegidos de intempéries.

O agregado graúdo utilizado na produção do concreto foi a brita de tamanho 19 mm, ou seja, brita nº1 foi utilizada como diâmetro máximo. Obteve-se, também, 1 m³ desse material, onde removeu-se materiais grosseiros e orgânicos (restos vegetais), posteriormente, armazenou-se em baía protegida de intempéries.

3.1.3 Resíduo do polimento do porcelanato

O resíduo do polimento do porcelanato (RPP) foi fornecido pelo Grupo Elizabeth, em uma de suas fábricas, localizada na rodovia BR 101, Km 98, Distrito Industrial, Conde – PB. O material foi coletado no pátio da empresa, úmido e aglomerado em torrões, devido ao processo de produção do porcelanato, onde o RPP entra em contato direto com a água.

O RPP foi transportado para UFPE/CAA, onde foi seco em estufa a uma temperatura de aproximadamente 100°C durante 24 horas. Em seguida, foi realizada a desagregação do material, por um moinho de bolas, composto por 20 bolas e com capacidade de 20 litros. Por fim, realizou-se o peneiramento do material em 0,075 mm (#200), onde o RPP passante foi armazenado em tonéis vedados.

3.1.4 Água

A água de amassamento utilizada foi a potável, proveniente da concessionária de abastecimento de água local. Conforme a NBR 15900-1 (ABNT, 2009), esse tipo de água é considerado adequado para uso em concreto e não necessita ser ensaiada. A mesma foi utilizada em temperatura ambiente.

3.1.5 Aditivo superplastificante

Foi empregada uma solução de superplastificante (SP) comercial baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado, denominado como GLENIUM 51 BASF. As características desse superplastificante, fornecidas pela The Chemical Company BASF, encontram-se expostas na Tabela 5.

Tabela 5 - Características do superplastificante utilizado.

| Natureza | pH | Densidade (g/cm³) | Sólidos (%) | Viscosidade (cps) |
|--------------------|-----------|---|------------------------|------------------------------|
| Superplastificante | 5 - 7 | 1,07 – 1,11 | 28,5 – 31,5 | < 150 |

Fonte: The Chemical Company BASF (2017).

3.2 Caracterização dos materiais

3.2.1 Massa unitária

Para determinar a massa unitária dos agregados, cimento e RPP, seguiu-se os procedimentos estabelecidos pela NBR NM 45 (ABNT, 2006). Adotou-se o método A, que determina a massa unitária de material compactado, que é exigido para a dosagem do concreto pelo método ABCP.

3.2.2 Massa específica real

As massas específicas reais do cimento (CP V – ARI) e do RPP foram determinados conforme o método descrito na NBR 16605 (ABNT, 2017). Já para a determinação das massas específicas reais dos agregados miúdo e graúdo, seguiram-se os métodos estabelecidos pela NM 52 (ABNT, 2009) e NM 53 (2009), respectivamente.

3.2.3 Distribuição granulométrica

Na determinação granulométrica dos agregados utilizou-se a NBR NM 248 (ABNT, 2003), obtendo-se a composição granulométrica, diâmetro máximo e módulo de finura. Para o CP V – ARI e o RPP foi realizada granulometria à laser com o analisador de tamanho de partículas da marca Microtrac S3500.

3.2.4 Área superficial específica por BET

As áreas superficiais específicas do CP V – ARI e do RPP foram determinadas pelo método Brunauer-Emmett-Teller (BET), por adsorção de nitrogênio, também, denominado de ensaio de condensação capilar. O ensaio foi realizado através do analisador de superfície e de tamanho de poros da marca Micromeritics ASAP 2420.

3.2.5 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A análise de fluorescência de Raios-X, que determina a composição química do material, foi realizada para o RPP. Para isso, utilizou-se o equipamento EDX 720 da Shimadzu, em atmosfera de nitrogênio (N₂), em que foram determinadas as constituições de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, TiO₂, CaO, MgO, Na₂O e resíduo insolúvel, como sendo as determinações usuais.

3.2.6 Difração de Raios-X (DRX)

Foram realizadas as difrações de Raios-X do CP V – ARI e do RPP para determinar as fases cristalográficas presentes. Utilizou-se o método convencional (pó seco), com o difratômetro de Raios-X Bruker D8 Advance Davinci. As condições de operação foram fixadas em: radiação de CuK α (40 kV/40 mA), leitura de 2 θ , variando de 10° a 70°, com passo de 0,02 a cada 0,5 segundo.

3.2.7 Análise térmica

Para a análise térmica foi utilizada termobalança RB – 300, da BP Engenharia, utilizando velocidade de aquecimento de 12,5 °C/min até a temperatura máxima de 1000°C. As amostras de resíduos do polimento do porcelanato, empregadas nessa análise, foram peneiradas em 0,074 mm (#200) e não passaram pela etapa de secagem.

3.2.8 Índice de atividade pozolânica

A determinação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) do resíduo do polimento do porcelanato foi procedida conforme orientado pela NBR 5752 (ABNT, 2014). Nesse ensaio, a norma estabelece os traços a serem utilizados para a determinação da atividade pozolânica, bem como o tipo de cimento, conforme pode ser observado no Quadro 1.

Quadro 1 - Informações do ensaio de índice de atividade pozolânica.

| Material | Massa (g) | |
|----------------------------|-------------|--------------------------|
| | Argamassa A | Argamassa B ^a |
| Cimento CP II-F-32 | 624 ± 0,4 | 468 ± 0,4 |
| Material pozolânico | - | 156 ± 0,2 |
| Areia normal ^b | 1872,0 | 1872,0 |
| Água | 300 ± 0,2 | 300 ± 0,2 |
| Aditivo superplastificante | - | ^c |

^a O material pozolânico e o cimento CP II-F-32 devem ser previamente misturados e homogeneizados em recipiente fechado, durante 2 min, aproximadamente.

^b Quatro frações de (468,0 ± 0,3) g.

^c Quantidade de aditivo superplastificante necessária para manter o índice de consistência normal da Argamassa B em ± 10 mm do obtido com a Argamassa A, determinado conforme ABNT NBR 7215: 1997, Anexo B. O aditivo deve ser adicionado na água de amassamento diretamente na cuba. O uso de aditivo é dispensável quando o índice de consistência da Argamassa B for igual (± 10 mm) ou maior que o da Argamassa A.

Fonte: Adaptado da NBR 5752 (ABNT, 2014).

Como é determinado que se utilize o CP II-F-32, foi usado esse tipo de cimento da marca Brennand Cimentos. Por fim, com o resultado obtido pela divisão do valor da resistência da argamassa B (argamassa com substituição do cimento por RPP) pela resistência da argamassa A (argamassa sem RPP) multiplicado por 100, foi verificado se o RPP em questão é considerado um material pozolânico, conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014), onde esse resultado deve ser no mínimo 90%. A moldagem e cura dos corpos de prova, para esse ensaio, seguiram as orientações da NBR 7215 (ABNT, 1996).

3.3 Método de dosagem do concreto

O concreto foi dosado de acordo com o método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), autoria de Rodrigues (1998). O método da ABCP é baseado no método do *American Concrete Institute* (ACI) 211, sendo adaptado as características do Brasil.

3.3.1 Determinação dos traços

Com o resultado da caracterização dos materiais e determinando as características do concreto requerido, utilizou-se o método da ABCP e determinou-se o traço padrão.

A partir disso, foi determinado os traços com a incorporação do RPP, tanto em substituição parcial do cimento, como em adição. Em ambos os casos, o consumo de cimento foi mantido constante para todos os traços, a fim de avaliar a influência real do RPP, isentando qualquer alteração nas propriedades do concreto devido à divergência do consumo de cimento entre os traços. Entretanto, para manter o consumo de cimento constante foi necessário corrigir a quantidade de areia em cada mistura. Alterações na compactação são esperadas com essa proposta, mas se optou por manter o consumo por metro cúbico de cimento constante em todos os traços avaliados. Nos traços foram utilizados aditivo superplastificante (SP), visto que, a incorporação de RPP na mistura diminui a trabalhabilidade; com isso, foi adotado como valor de partida o teor de 1% de aditivo em relação à massa de cimento.

3.3.2 Determinação do traço padrão

Na determinação do traço padrão, a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) requerido foi de 30 MPa, em que segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), a resistência mínima para uma estrutura de concreto armado em um ambiente urbano (classe de agressividade ambiental II) é de 25 MPa. Adotou-se o desvio padrão (S_d) na condição A, aplicável as classes C10 até C80, conforme estabelece a NBR 12655 (ABNT, 2015), onde o S_d tem o valor de 4 MPa. Com esses dados, obteve-se a resistência à compressão do concreto aos 28 dias (f_{c28}) igual a 36,6 MPa.

Com o cimento tendo uma resistência normal aos 28 dias de 37 MPa e um f_{c28} igual a 36,6 MPa, encontrou-se a relação a/c igual a 0,50, estando em conformidade com a relação a/c para um concreto no ambiente urbano, que é menor ou igual a 0,60, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Adotou-se um abatimento do tronco de cone entre 40 e 60 mm, e tendo um agregado graúdo com dimensão máxima de 19 mm, encontrou-se o consumo de água (C_w) de 195 l/m³. Com isso, determinou-se o consumo de cimento (C) de 390 Kg/m³.

A areia utilizada possui um módulo de finura igual a 2,57, e o agregado com dimensão máxima de 19 mm; com isso, encontrou-se o volume aparente de agregado graúdo (V_b) igual a 0,69 m³/m³. Com o agregado graúdo tendo massa unitária compactada igual a 1476 Kg/m³, calculou-se o consumo de agregado graúdo (C_b), obtendo-se um valor de 1021,2 Kg/m³.

Determinou-se o consumo de areia (C_m), em que a areia utilizada possui uma massa específica de $2583,98 \text{ Kg/m}^3$ e um volume de $0,293 \text{ m}^3/\text{m}^3$, onde obteve-se um C_m igual a $757,69 \text{ Kg/m}^3$. Por fim, expressa-se o traço com relação à massa de cimento, em que o traço de referência foi de 1:1,94:2,62:0,5 (cimento:areia:brita:a/c).

3.3.3 Determinação do traço com incorporação do RPP

Com o traço padrão definido, foi desenvolvido os traços com incorporação de RPP, como substituição parcial do cimento e, também, adição. Como estabelecido no subitem 3.1.1, o consumo de cimento foi mantido igual para todos os traços, para isso foi corrigido a quantidade de areia em cada mistura. Foi utilizado 1% de SP em relação a massa de cimento, como teor de aditivo de partida, e aumentando quando ocorreu a impossibilidade de moldagem dos corpos de prova (CP's).

Nesse trabalho, foi definido, tanto para substituição como para adição, teores de RPP de 10, 20, 30, 40 e 50%, pois teores maiores que 50% demandavam bastante SP para ter uma trabalhabilidade adequada. Pode ser observado, na Tabela 6, os traços de substituição e, na tabela 7, os traços com adição de RPP.

Tabela 6 - Traços de substituição parcial do cimento por RPP com consumo 390 kg/m^3 .

| Traços | Cimento (c) | Areia (a) | Brita (b) | RPP | a/c | SP |
|------------|-------------|-----------|-----------|------|------|-------|
| Referência | 1,00 | 1,94 | 2,62 | 0,00 | 0,50 | 0,010 |
| S10 | 0,90 | 1,92 | 2,62 | 0,10 | 0,50 | 0,010 |
| S20 | 0,80 | 1,90 | 2,62 | 0,20 | 0,50 | 0,010 |
| S30 | 0,70 | 1,88 | 2,62 | 0,30 | 0,50 | 0,020 |
| S40 | 0,60 | 1,85 | 2,62 | 0,40 | 0,50 | 0,025 |
| S50 | 0,50 | 1,83 | 2,62 | 0,50 | 0,50 | 0,025 |

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 7 - Traços com adição de RPP com consumo 390 kg/m^3 .

| Traços | Cimento (c) | Areia (a) | Brita (b) | RPP | a/c | SP |
|------------|-------------|-----------|-----------|------|------|-------|
| Referência | 1,00 | 1,94 | 2,62 | 0,00 | 0,50 | 0,010 |
| A10 | 1,00 | 1,84 | 2,62 | 0,10 | 0,50 | 0,010 |
| A20 | 1,00 | 1,73 | 2,62 | 0,20 | 0,50 | 0,010 |
| A30 | 1,00 | 1,63 | 2,62 | 0,30 | 0,50 | 0,010 |
| A40 | 1,00 | 1,53 | 2,62 | 0,40 | 0,50 | 0,010 |
| A50 | 1,00 | 1,42 | 2,62 | 0,50 | 0,50 | 0,010 |

Fonte: O Autor (2019).

3.4 Preparo dos concretos

Com os traços definidos, pesaram-se os materiais, que foram inseridos na betoneira na seguinte ordem: 50% da água, 100% do agregado graúdo, 100% do agregado miúdo, 100% do cimento, 100% do RPP (nos traços com 10, 20, 30,40 e 50% de RPP) e o restante da água misturada com o aditivo SP. O tempo de mistura dos materiais na betoneira foi de 5 minutos.

Na confecção dos corpos de prova (CP's), seguiu-se os critérios estabelecidos pela NBR 5738 (ABNT, 2015) para o processo de moldagem e cura, tendo os CP's dimensões de 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro.

3.5 Ensaio no estado fresco

3.5.1 Abatimento do tronco de cone

O ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) seguiu as recomendações estabelecidas na NBR NM 67 (ABNT, 1998). Esse ensaio é de fundamental importância para o concreto, visto que, através dele é determinado sua consistência.

3.6 Ensaio no estado endurecido

No estado endurecido, foram analisados o comportamento mecânico e os indicadores de durabilidades dos concretos confeccionados. A seguir será abordado como os ensaios foram realizados.

3.6.1 Comportamento mecânico

3.6.1.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), sendo utilizados três CP's para cada uma das idades: 7, 28 e 91 dias de cura úmida. Para a realização do ensaio, foi utilizada uma prensa hidráulica servo

controlada da marca Shimadzu e modelo UH – 2000KNI, com uma velocidade constante de 3 mm/min, tendo capacidade de 200 toneladas.

A fim de corrigir as irregularidades do topo e da base dos CP's foram utilizados pratos com neoprene em ambas as extremidades. O resultado foi definido como a média da resistência à compressão dos três CP's.

3.6.2 Indicativos de durabilidade

3.6.2.1 *Absorção de água por imersão*

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado com três CP's na idade de 28 dias, em conformidade com a NBR 9778 (ABNT, 2005). Após os 28 dias de cura úmida, os CP's foram secos em estufa durante 72 horas a uma temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$, depois tiveram suas massas medidas. Em seguida, foram imersos em água a uma temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, durante 72 horas e tiveram suas massas novamente aferidas. Para determinar a absorção de água foi necessário subtrair o valor da massa seca do valor da massa saturada; depois o valor obtido foi dividido pelo valor da massa seca e multiplicado por 100. O resultado foi definido como a média dos três CP's, expresso em porcentagem. Esse ensaio fornece um indicativo da porosidade do material, podendo correlacionar seus valores com outras propriedades do concreto, como: resistência e durabilidade.

3.6.2.2 *Absorção de água por capilaridade*

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado na idade de 28 dias com três CP's, conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012). Para a realização do ensaio, os corpos de prova foram colocados na estufa por 72 horas a uma temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$; em seguida, tiveram suas massas medidas. De posse de suas massas secas, os corpos de prova foram colocados em uma lâmina de água de 5 ± 1 mm em contato com sua face inferior. Depois, foram medidas as massas saturadas dos CP's com 3, 6, 24, 48 e 72 horas. Após cada medição, os CP's retornaram imediatamente à imersão na lâmina de água. O resultado foi obtido pela subtração da massa saturada pela massa seca, e o valor obtido foi dividido pela área da seção transversal do corpo

de prova. Adotou-se como resultado a média dos três corpos de prova (CP's), em g/cm², onde foi possível desenvolver a curva de absorção de água por capilaridade.

3.6.2.3 Resistência à compressão do concreto exposto ao meio ambiente

O ensaio de resistência à compressão do concreto após exposição ao meio ambiente foi realizado conforme o subitem 3.6.1.1; porém, após 28 dias de cura úmida, os corpos de prova ficaram expostos ao meio ambiente, sujeitos a intempéries da localidade 8°13'33.5"S 35°58'54.0"O (UFPE-Caruaru) durante 5 meses, a fim de avaliar a influência do meio ambiente na sua resistência. Os CP's de referência, S10, S20, S30, S40 e S50 ficaram exposto no período de junho a novembro de 2017; já os CP's A10, A20, A30, A40 e A50 ficaram de outubro de 2017 a março de 2018.

3.6.2.4 Resistência ao ataque ácido

O ensaio de resistência ao ataque ácido foi realizado com uma amostra dos traços de referência, S30, S50, A30 e A50 para cada tipo de ácido. As dimensões das amostras utilizadas foram de 2x2x1,4 cm, em que foram extraídas da parte central de um corpo de prova com 5 meses de idade, com o auxílio de uma serra circular segmentada. Foram utilizadas soluções aquosas de ácido acético (CH₃COOH), ácido clorídrico (HCl) e ácido sulfúrico (H₂SO₄); todos na concentração de 0,1 molar.

O procedimento para a realização desse ensaio foi, inicialmente, secar as amostras em estufa com uma temperatura de 65 ± 5°C durante 48 horas. Após a secagem, as amostras foram pesadas e imersas no recipiente (com volume de 1 litro) contendo 500 ml de ácido. Os recipientes foram fixados no agitador rotativo para não voláteis TE-743 da marca Tecnal e ficaram rotacionando a uma velocidade de 30 rpm, em conformidade com a NBR 10005 (ABNT, 2004) durante 24 horas. No final, as amostras foram secas na estufa, com temperatura de 65 ± 5°C durante 48 horas, e medidas as suas massas, comparando-as com as massas iniciais. O resultado foi expresso em porcentagem.

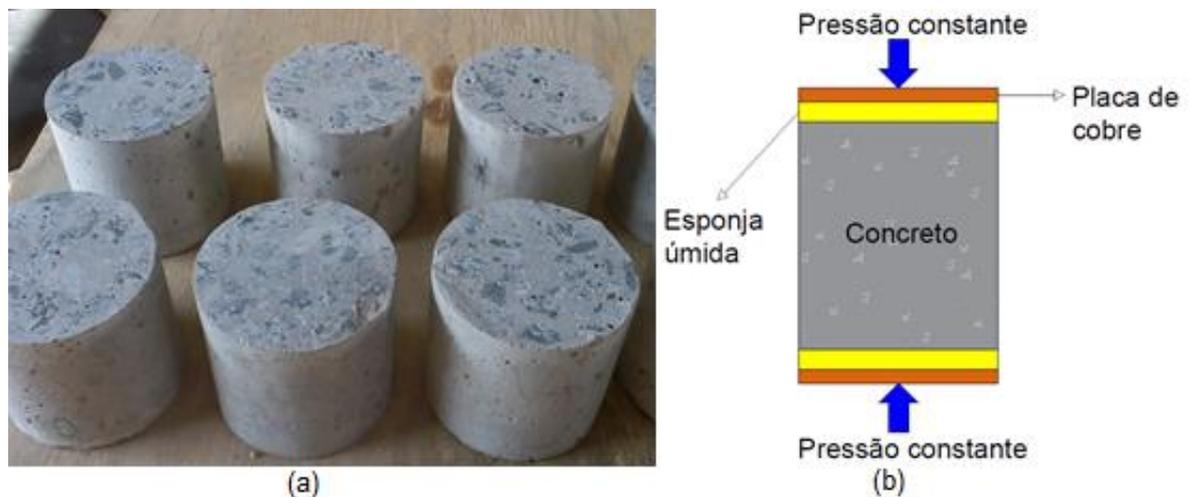
Esse ensaio tem como finalidade identificar quais os elementos que foram lixiviados por cada tipo de ácido, analisando as possíveis alterações causadas pela incorporação do RPP.

3.6.2.5 Resistividade elétrica

A resistência elétrica das amostras foi medida aplicando-se 300 mV com a técnica de duas sondas, utilizando corrente alternada (CA) a 200 kHz, conforme Lavagna *et al.* (2018). A corrente alternada é recomendada porque resolve dificuldades técnicas e problemas, como efeitos de polarização, relacionados com medições de corrente contínua (CC) (LEE e WANG, 2010). Apesar que alguma polarização pode ocorrer mesmo quando se aplicam correntes alternadas, se a frequência for alta o suficiente, o efeito de polarização é limitado a um intervalo tolerável (WEN e CHUNG, 2001).

Nesse ensaio, as amostras utilizadas tinham 1 ano e 2 meses de idade e foram cortadas ao meio (Figura 4a), possuindo altura de 10 cm; e, secas em estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Em seguida, foram resfriadas ao meio ambiente e colocadas no aparelho que consiste em duas placas de cobres na extremidade, onde entre as amostras e a placa foram colocadas esponjas úmidas, conforme apresentado na Figura 4b (ZHU *et al.*, 2018).

Figura 4 - Ensaio de resistividade elétrica: (a) amostras utilizadas e (b) método adotado.



Fonte: O Autor (2019).

O teor de umidade das esponjas foi controlado por imersão total na água, para molhá-las completamente, e, em seguida, aplicou-se uma pressão uniforme para expulsar a água em excesso. Todas as medidas foram realizadas durante um período menor que 2 minutos, de modo que qualquer variação na umidade da esponja, durante as medições, fosse minimizada (ZHU *et al.*, 2018).

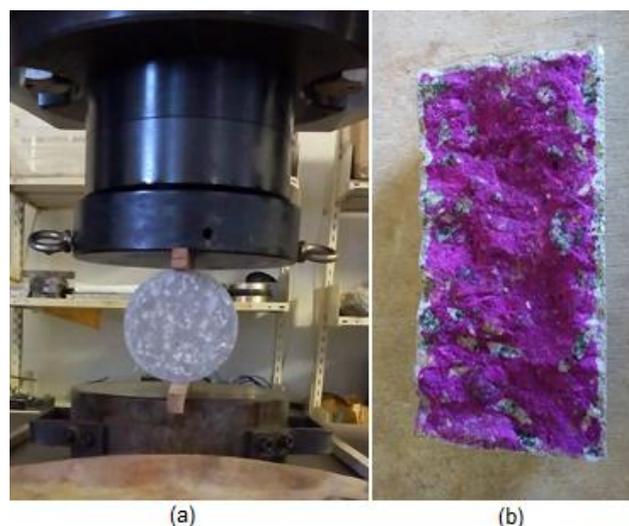
Por fim, foram obtidos os valores da resistência elétrica, em que se determinou a resistividade elétrica multiplicando o valor da resistência elétrica com o valor obtido pela razão da área transversal e comprimento da amostra. O resultado final foi definido como a média de dois corpos de prova, expresso em Ohm.m.

A realização desse ensaio fornece parâmetros de porosidade e reatividade do RPP, porque quanto menor a porosidade e maior a reação pozolânica, conseqüentemente, maior será a resistividade elétrica.

3.6.2.6 Profundidade de carbonatação

No ensaio de profundidade de carbonatação, os CP's foram deixados expostos no laboratório após 28 dias de cura úmida para carbonatação natural. Foram ensaiados com 1 ano e 2 meses de exposição, em que foram rompidos à tração por compressão diametral, Figura 5a. O método utilizado foi o colorimétrico (RILEM, 1984), que consiste em tratar uma superfície recém-rompida com solução de fenolftaleína diluída em álcool (na proporção de 1g/100g), como apresentado na Figura 5b. Por fim, utilizou-se o paquímetro digital para medir a profundidade carbonatada, sendo o resultado a média de dois corpos de prova, expresso em milímetro.

Figura 5 - Ensaio de profundidade de carbonatação: (a) ruptura e (b) superfície da amostra com a solução de fenolftaleína.



Fonte: O Autor (2019).

Como pode ser observado na Figura 5b, a amostra adquire uma tonalidade rosa, correspondendo ao componente básico, enquanto a área carbonatada permanece com a mesma cor, referente ao componente não-alcálico.

3.7 Análise cristalográfica e térmica

3.7.1 Difração de Raios-X do concreto

A análise da DRX foi realizada em pastas extraídas de amostras dos concretos, tendo essas amostras dimensões 2x2x1,4 cm, após 91 dias em cura úmida, seguida de 1 ano e meio em cura ambiente. Extraíu-se fragmentos da pasta das amostras que, em seguida, foram triturados e peneirados em 0,075 mm (#200), utilizando-se o material passante. Os traços escolhidos para a realização dessa análise foram o concreto de referência, S30, S50, A30 e A50.

Para determinar as fases cristalográficas presentes nas amostras, utilizou-se o método convencional (pó seco), com o difratômetro de Raios-X modelo XRD-6000 da Rigaku. As condições de operação foram fixadas em: radiação de $\text{CuK}\alpha$ (40 kV/40 mA), leitura de 2θ , variando de 10° a 80° , com passo de 0,02 a cada 0,5 segundo.

3.7.2 Termogravimetria do concreto

As amostras utilizadas foram obtidas de modo igual ao subitem 3.7.1, com os mesmos traços. Na análise termogravimétrica, foi utilizada a termobalança analítica modelo STA 2500 Regulus da Netzsch. O ensaio foi realizado em um cadinho de alumina, sem tampa, atmosfera de nitrogênio (N_2), com vazão de 100 ml/min e uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ entre 20°C e 900°C .

Aplicou-se o fator que relaciona a massa molecular do carbonato de cálcio (100,09) e a massa molecular do dióxido de carbono (44,00), em que o resultado da divisão dessas massas é 2,27, sendo esse valor multiplicado pela perda de massa referente à decomposição do dióxido de carbono em porcentagem, a fim de determinar o teor de carbonato de cálcio presente nas amostras (PILAR *et al.*, 2016; HOPPE FILHO *et al.*, 2017).

3.8 Análise de emissão de CO₂

3.8.1 Índice de Intensidade do Ligante (IIL)

O Índice de Intensidade do Ligante (IIL) foi realizado conforme proposto por Daminieli *et al.* (2010); pois de acordo com a literatura o resíduo do polimento do porcelanato (RPP) pode possuir atividade pozolânica; portanto, pode ter ação ligante. O IIL corresponde ao consumo de ligante por m³ de concreto para atingir 1 MPa de resistência à compressão; ou seja, o índice de intensidade do ligante é a razão do consumo de cimento e RPP utilizado pela resistência à compressão obtida, sendo expressa em kg.m⁻³.MPa⁻¹. Esta análise foi realizada nos concretos com resistência à compressão aos 91 dias.

3.8.2 Potencial de Aquecimento Global (PAG)

Essa análise foi realizada conforme Matos *et al.* (2018b), em que foi escolhida a média da resistência à compressão dos concretos aos 91 dias. Com base no IIL obtido na análise anterior (subitem 3.8.1) e a partir dessa resistência média, uma simulação dos consumos de cimento e dos demais materiais constituintes do concreto foi realizada para cada traço. Em seguida, foi estimado o Potencial de Aquecimento Global (PAG) para cada mistura, obtida pela soma das emissões equivalentes de CO₂ relacionadas aos constituintes (cimento Portland, agregados miúdo, agregado graúdo, RPP e superplastificante) e processo de produção de concreto (mistura, transporte e lançamento).

Os valores adotados de emissões equivalentes de CO₂ por kg de material (para os constituintes) e por m³ de concreto (para o processamento) são: cimento Portland = 1,0, superplastificante = 0,5, agregado miúdo = 0,014, agregado graúdo = 0,046 e mistura + transporte + lançamento = 1,5 (FLOWER e SANJAYAN, 2007; CASSAGNABÈRE *et al.*, 2010; LIU *et al.*, 2012; TURNER e COLLINS, 2013; CELIK *et al.*, 2015). Para o RPP, foi adotada uma emissão equivalente de 0,05 kg CO₂-eq/kg, que corresponde à energia utilizada para secar o material, conforme Matos *et al.* (2018b).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Massa unitária

O resultado da massa unitária dos materiais utilizados, conforme o subitem 3.2.1, encontra-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Massa unitária dos materiais.

| Material | Massa unitária (g/cm ³) |
|-------------------------|-------------------------------------|
| CP V - ARI | 1,05 |
| RPP | 0,47 |
| Agregado miúdo (areia) | 1,40 |
| Agregado graúdo (brita) | 1,48 |

Fonte: O Autor (2019).

Como pode ser observado, as massas unitárias dos agregados utilizados se apresentaram bem próximas. O cimento, como esperado, possui massa unitária menor que os agregados, e o RPP com uma massa unitária 55,24% inferior ao do cimento.

Isso implica que o RPP necessita de um maior volume para atingir a mesma quantidade de massa dos demais materiais, ratificando a importância de se corrigir o traço em termos da manutenção do consumo, a fim de que as interferências observadas no comportamento mecânica e microestrutural do sistema sejam em função da incorporação do RPP, e não influenciadas pela redução na quantidade de cimento por metro cúbico do sistema.

4.1.2 Massa específica real

Os valores obtidos na determinação da massa específica real dos componentes do concreto, realizado conforme o subitem 3.2.2, estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9 - Massa específica real dos materiais.

| Material | Massa específica real (g/cm ³) |
|-------------------------|--|
| CP V - ARI | 3,15 |
| RPP | 2,48 |
| Agregado miúdo (areia) | 2,58 |
| Agregado graúdo (brita) | 2,63 |

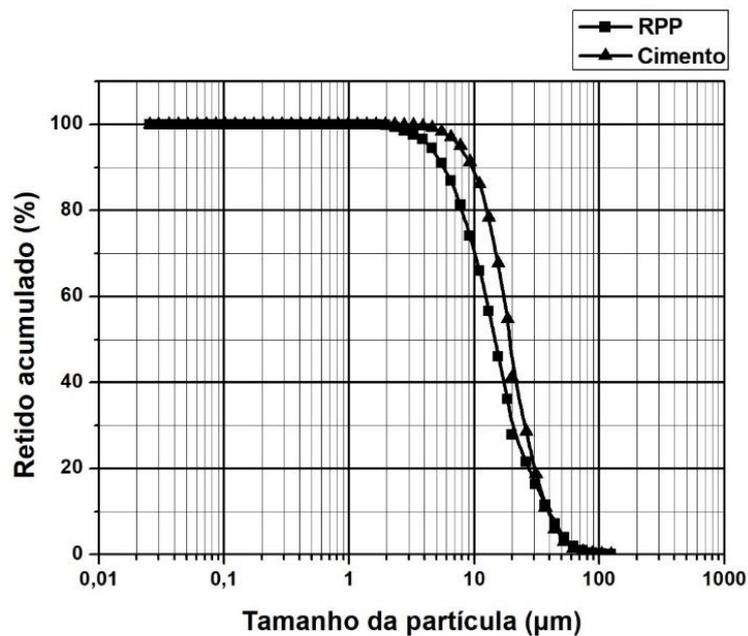
Fonte: O Autor (2019).

O cimento foi o material com maior massa específica real, já o RPP apresentou menor massa específica real, sendo 21,27% menor que a massa específica do cimento, e os agregados valores intermediários.

4.1.3 Distribuição granulométrica

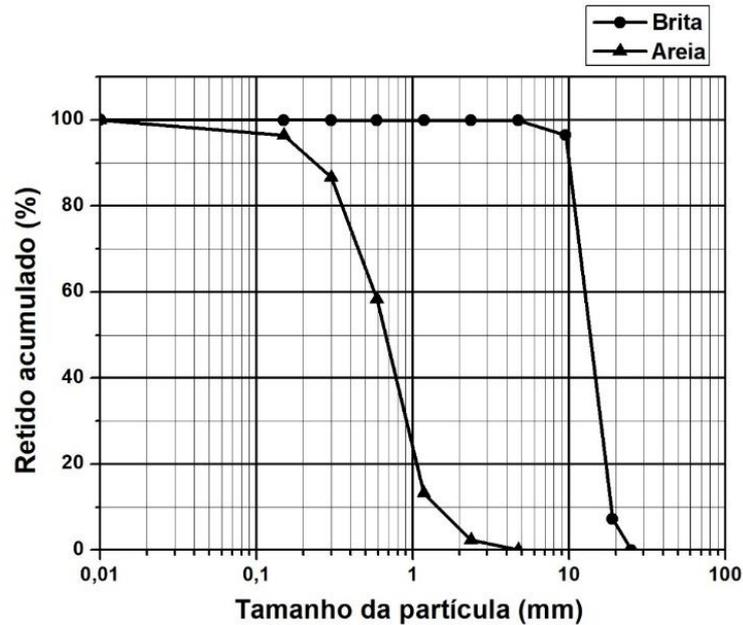
Como descrito no subitem 3.2.3, a granulometria do RPP e cimento foram mensuradas à laser, já a os agregados nas peneiras de série normal. As curvas granulométricas do RPP e cimento e dos agregados são mostrados nos Gráficos 5 e 6, respectivamente.

Gráfico 5 - Curva granulométrica do RPP e cimento.



Fonte: O Autor (2019).

Gráfico 6 - Curva granulométrica da areia e brita.



Fonte: O Autor (2019).

Como pode ser observado na Gráfico 5, o RPP e o cimento possuem curvas granulométricas semelhantes. Porém, para frações granulométricas maiores, confirma-se que o RPP é mais fino que o cimento. Assim, o comportamento de absorção de água pelo RPP ocorre em toda sua faixa granulométrica. Outro ponto importante é que, pela sua curva granulométrica, o RPP pode ocupar espaços vazios entre as partículas de cimento, produzindo um efeito fíler.

Além da curva granulométrica do cimento e RPP, o ensaio de granulometria à laser forneceu o diâmetro médio, como pode ser observado na Tabela 10. Como pode ser visualizado na Tabela 10, o RPP apresenta um diâmetro médio de 4,32 μm , que é 45,25% menor que o do cimento, o que favorece sua atuação como efeito fíler e acelera possíveis atividades pozolânicas, uma vez que incrementa sua área superficial de contato.

Tabela 10 - Diâmetro médio das partículas do cimento e RPP.

| Materiais | Diâmetro médio (μm) |
|-----------|----------------------------------|
| Cimento | 7,89 |
| RPP | 4,32 |

Fonte: O Autor (2019).

Para o desenvolvimento do traço é necessário conhecer, também, o módulo de finura (MF) e a dimensão máxima características ($D_{m\acute{a}x}$) dos agregados. Logo, na Tabela 11, é apresentado o MF e $D_{m\acute{a}x}$ dos agregados, determinado conforme estabelecido na NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Tabela 11 - MF e $D_{m\acute{a}x}$ dos agregados utilizados.

| Agregados | MF | $D_{m\acute{a}x}$ |
|-----------|-----|-------------------|
| Areia | 2,4 | 2,57 |
| Brita | 7,0 | 19 |

Fonte: O Autor (2019).

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), a areia utilizada se encontra no limite superior na zona ótima, e a brita na zona granulométrica d/D (menor/menor dimensão) igual a 9,5/25. Concluindo que os agregados utilizados podem ser utilizados em concreto. Se considerado a NBR 7211 (ABNT, 1983), a areia é classificada como areia média e a brita com graduação 1 (brita 1).

4.1.4 Área superficial específica pelo método de BET

A área superficial específica do cimento e do RPP foram determinadas pelo método de BET. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 - Área superficial específica do cimento e RPP.

| Material | Área superficial (m^2/g) |
|----------|------------------------------|
| RPP | 2,79 |
| Cimento | 1,90 |

Fonte: O Autor (2019).

Com os dados apresentados na Tabela 12, o RPP tem uma área superficial específica 46,84% maior que a do cimento. Conclui-se, assim, que as misturas com maiores teores de RPP tendem a absorver maiores quantidades de água, pois é necessária mais água para o recobrimento de toda a superfície das suas partículas.

4.1.5 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A amostra de RPP utilizada para o ensaio de FRX apresentou maiores concentrações de SiO_2 , Al_2O_3 e MgO e menores concentrações de K_2O , CaO , Fe_2O_3 , TiO_2 , entre outros elementos, como pode ser visto nas Tabela 13. O SiO_2 é proveniente da massa do porcelanato e do abrasivo, o Al_2O_3 advém da matéria prima do porcelanato e o MgO devido ao abrasivo, conforme observado no ensaio de DRX (subitem 4.1.6).

Tabela 13 - Análise química por FRX do RPP.

| Elementos | Teores (%) |
|-------------------------|------------|
| SiO_2 | 64,317 |
| Al_2O_3 | 19,275 |
| MgO | 10,318 |
| K_2O | 2,804 |
| CaO | 1,705 |
| Fe_2O_3 | 0,940 |
| TiO_2 | 0,317 |
| SO_3 | 0,101 |
| MnO | 0,099 |
| ZrO_2 | 0,064 |
| Rb_2O | 0,021 |
| SrO | 0,019 |
| ZnO | 0,014 |
| NbO | 0,003 |
| Y_2O_3 | 0,003 |

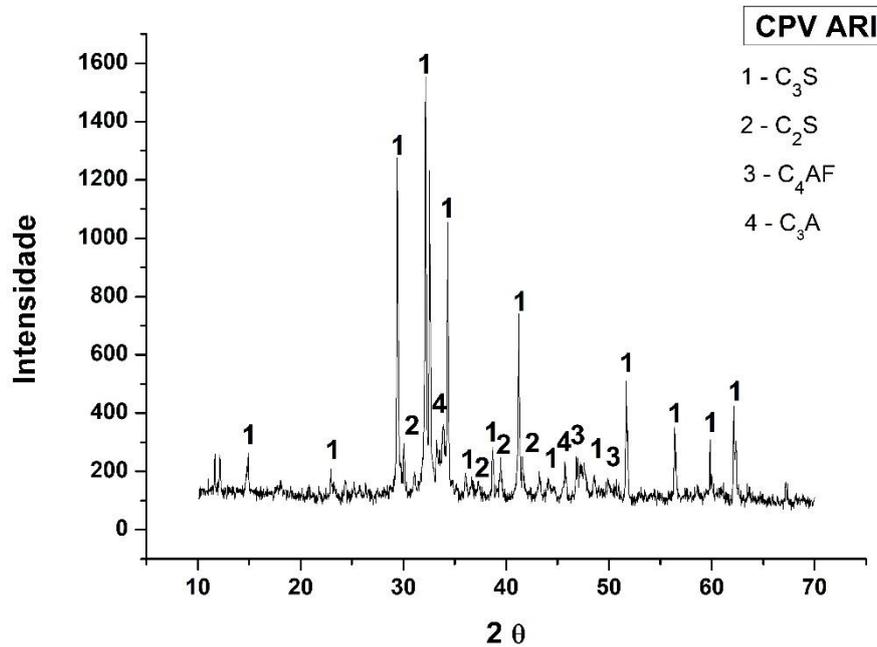
Fonte: O Autor (2019).

A NBR 12653 (ABNT, 2014) estabelece que para um material ser considerado pozolânico a soma dos elementos, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, devem ser maiores ou iguais a 70%, e a quantidade de SO_3 e Na_2O menor ou igual, respectivamente, a 4% e 1,5%. Logo, o RPP tem soma igual a 84,532%, SO_3 igual a 0,101% e Na_2O igual a 0,000%, classificando-o, nesse requisito, como material pozolânico.

4.1.6 Difração de Raios-X (DRX)

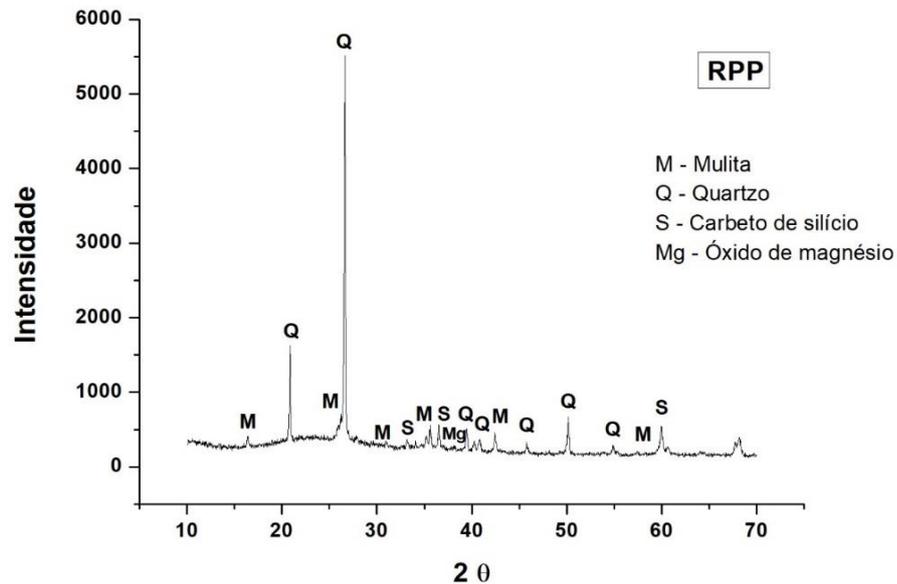
Com a realização do DRX, foram obtidos os difratogramas de Raios-X das amostras de cimento (CP V-ARI) e RPP, respectivamente, Gráficos 7 e 8.

Gráfico 7 - Fases cristalinas do cimento.



Fonte: O Autor (2019).

Gráfico 8 - Fases cristalinas do RPP.



Fonte: O Autor (2019).

Algumas fases anidras comuns ao cimento podem ser vistas no difratograma de Raios-X do cimento CPV ARI, Gráfico 7. Pode-se observar que no pico de maior

intensidade a 32° localizasse a Alita (C_3S). Encontra-se, também, picos referentes à Belita (C_2S), Ferrita (C_4AF) e Aluminato (C_3A). Segundo Nascimento (2014), intensidades reduzidas de picos da Belita ratificam a classificação do cimento como CP V ARI.

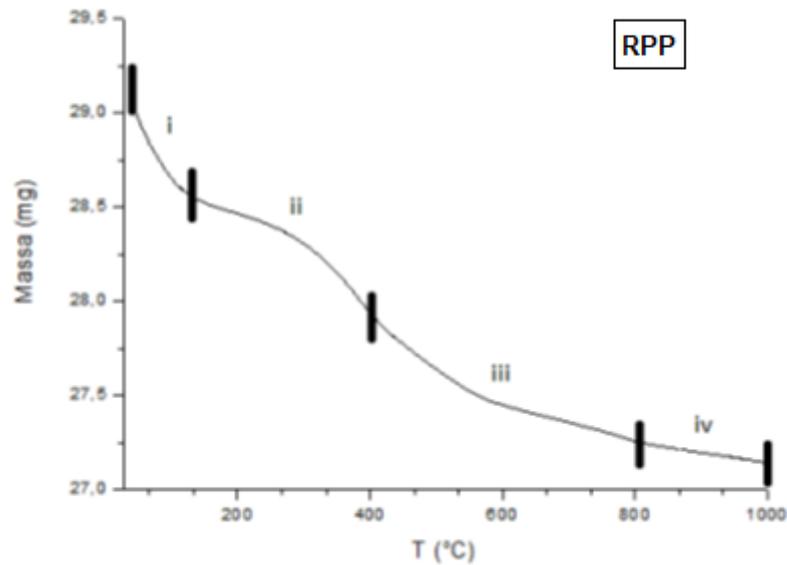
Com relação ao difratograma de Raios-X do RPP, Gráfico 8, identifica-se no pico de maior intensidade a 27° o quartzo, encontrando-se também em 21°, 39°, 41°, 46°, 50° e 55°. Outras fases cristalinas são encontradas, como a mulita (17°, 26°, 31°, 35°, 42° e 58°), carbetto de silício (34°, 37° e 60°) e óxido de magnésio (38°). A presença da mulita e do quartzo é decorrente a massa do porcelanato, já o carbetto de silício e o óxido de magnésio é derivado do agente abrasivo utilizado no processo do polimento do porcelanato. Resultados semelhantes foram encontrados nas pesquisas de Steiner (2014) e Nascimento (2016).

Além disso, ainda no Gráfico 8, identifica-se um halo amorfo bem alongado e mais acentuado na região de 20° a 30°, indicando que o resíduo do polimento do porcelanato (RPP) é um material que pode ter reatividade.

4.1.7 Análise térmica

Como pode ser observado no Gráfico 9, a curva de termogravimetria (TG), para a composição do resíduo do polimento do porcelanato, possui quatro etapas distintas de decomposição: i) no intervalo de temperatura até 136,15°C, há uma perda de massa no valor de 0,68 mg (2,33%), referente à evaporação de água; ii) na temperatura de 136,15°C até 402,62°C, ocorre outra perda de massa no valor de 0,62 mg (2,12%), correspondente à perda de matéria orgânica; iii) entre as temperaturas de 402,62°C e 804,49°C, há uma perda de massa no valor de 0,67 mg (2,29%), que é referente a um fenômeno de desidroxilação; e, iv) entre 804,49°C e 1001,83°C (temperatura final do ensaio), ocorre uma perda de massa de 0,11 mg (0,38%), correspondente a formação dos óxidos de magnésio e de potássio. O que representa uma perda total de massa de 2,08 mg, que corresponde a 7,12%. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva (2012) e Caetano *et al.* (2016), onde ambos utilizaram em suas pesquisas o RPP oriundo do mesmo local desse trabalho.

Gráfico 9 - Curva TG do RPP.



Fonte: O Autor (2019).

Logo, o RPP perdeu pouca massa, pois ele é um resíduo de um material já sinterizado, perdendo apenas 7,12 % de massa. No processo de sinterização, o porcelanato é submetido a temperatura acima de 1000°C, por isso o resíduo se encontra relativamente estável. Com isso, o RPP pode ser incorporado em materiais cimentícios que fiquem expostos ao sol e a altas temperaturas. Nesse caso, é interessante avaliar a resistência dos concretos com incorporação do RPP exposto ao meio ambiente.

4.1.8 Índice de Atividade Pozolânica (IAP)

Seguindo o processo estabelecido no item 3.2.8, realizou-se o ensaio de consistência da argamassa A, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016). Em seguida, foi feito o mesmo processo para a argamassa B, porém a mesma não atingiu a consistência, com uma diferença de ± 10 mm da argamassa A. Com isso, foi adicionado na argamassa B o aditivo superplastificante (SP), a fim de atingir a consistência necessária. Realizando vários testes, chegou-se ao teor de 1% de SP para a argamassa B, em que os valores obtidos constam na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultado do índice de consistência das argamassas.

| Argamassas | Medidas (mm) | | | | Diferença entre a argamassa A e B (mm) |
|------------|--------------|--------|--------|--------|--|
| | I | II | II | Média | |
| A | 145,13 | 148,27 | 146,08 | 146,49 | 1,13 |
| B | 142,62 | 145,18 | 148,30 | 145,37 | |

Fonte: O Autor (2019).

De posse do teor de SP para a argamassa B, realizou-se o processo de moldagem e cura dos CP's. Completando 28 dias, o CP's foram ensaiados com relação a resistência à compressão.

Depois dos ensaios, foram obtidos os resultados da resistência à compressão de cada argamassa e, com isso, determinou-se o índice de atividade pozolânica (IAP) do RPP, como pode ser visto na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultado do índice de atividade pozolânica.

| Argamassa | Resistência à compressão (MPa) | | | | | | IAP (%) |
|-----------|--------------------------------|------------|-------------|------------|-----------|-------|---------|
| | Amostra I | Amostra II | Amostra III | Amostra IV | Amostra V | Média | |
| A | 28,66 | 25,45 | 27,60 | 28,52 | 25,52 | 27,15 | 79,80 |
| B | 21,26 | 20,38 | 22,92 | 22,27 | 21,14 | 21,66 | |

Fonte: O Autor (2019).

Conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014), para o material ser classificado como pozolânico o seu Índice de Atividade Pozolânica (IAP) dever ser no mínimo 90%. Como o resultado obtido foi de 79,80%, o RPP não foi classificado como um material pozolânico; entretanto, como atingiu um IAP próximo do limite, há reatividade, e se decidiu avaliar o uso do mesmo em substituição ao parcial do cimento, tornando necessário a avaliação da resistência à compressão dos concretos aos 91 dias. O efeito da reatividade parcial com o hidróxido de cálcio somado ao efeito fíler podem garantir concretos com a possibilidade de substituição do cimento pelo RPP.

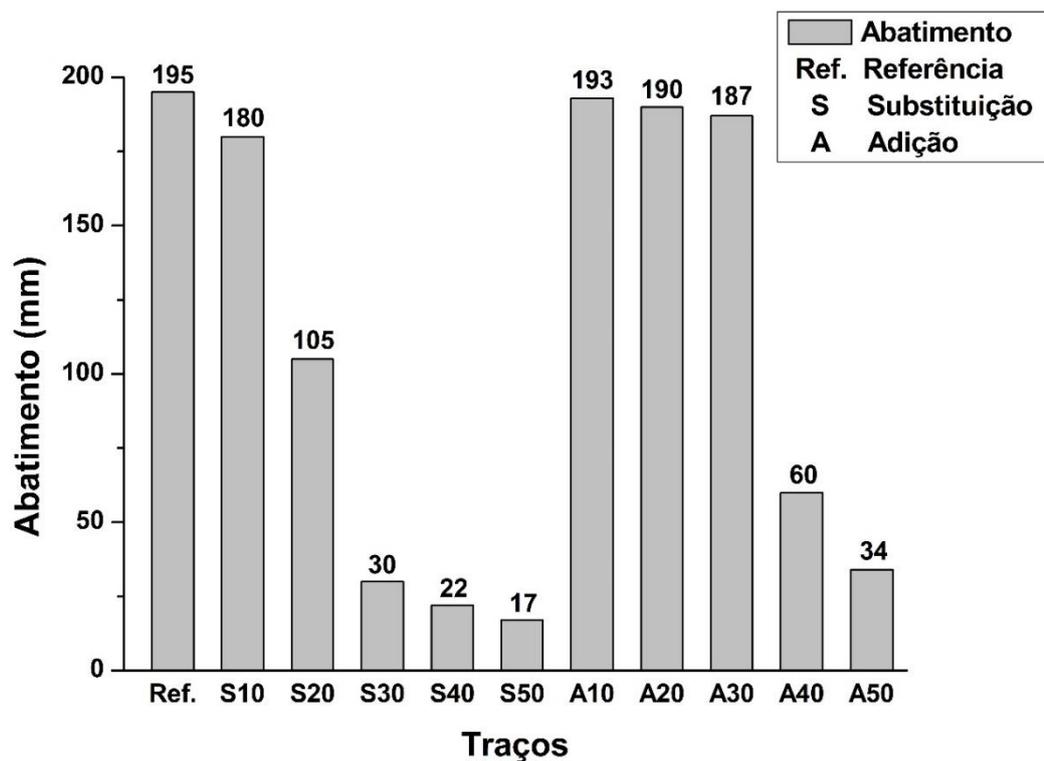
4.2 Ensaio no estado fresco

4.2.1 Abatimento do tronco de cone

Os resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone obtidos para todos os traços estão expostos no Gráfico 10. No método de dosagem, adotou-se, para o

traço de referência, um abatimento entre 40 e 60 mm, o qual foi confirmado com a realização do ensaio. No entanto, a fim de minimizar a interferência negativa, como comprovando em diversas pesquisas, do RPP na trabalhabilidade das misturas, optou-se por utilizar, em todas as misturas, aditivo superplastificante (SP), a fim de não prejudicar o processo de moldagem com concretos secos. Com isso em mente, foi usado 1% do superplastificante nos traços de referência, S10, S20, A10, A20, A30, A40 e A50; 2% no traço S30 e 2,5% para S40 e S50. Os traços S30, S40 e S50 foram aumentados devido a impossibilidade de moldagem com 1% de SP, sendo esse aumento realizado de modo a utilizar uma porcentagem mínima de SP que possibilitasse a moldagem.

Gráfico 10 - Resultados do abatimento do concreto.



Fonte: O Autor (2019).

Com relação aos traços de substituição, deve-se ressaltar que a trabalhabilidade diminuiu, inclusive aumentando a porcentagem do superplastificante (SP). No entanto, todos os concretos foram moldados sem problemas. A substituição parcial do cimento pelo RPP diminui a trabalhabilidade em 7,69% quando 10% do

cimento foi substituído por RPP; 46,15% para S20; 84,62% para S30; 88,72% para S40; e, 91,28% para S50.

Nos traços com adição, observou-se comportamento semelhante, porém não houve a necessidade de aumentar a porcentagem de SP; visto que, sua quantidade é em função da massa de cimento, explicando assim o motivo do aumento da dosagem nos traços com substituição, além do fato que os traços com substituição possuem maiores teores de areia, ou seja, mais material a ser molhado. À medida que aumentou a adição de RPP na mistura, conseqüentemente, diminuiu a trabalhabilidade. Nos traços A10, A20 e A30 houve uma pequena diminuição da trabalhabilidade correspondendo a 1,03%, 2,56% e 4,10%, respectivamente; já A40 e A50 diminuíram radicalmente, sendo 69,23% para A40 e 82,56% para A50.

Reduções na trabalhabilidade foram constatadas também no trabalho de Santos (2008), em que foi adicionado RPP em argamassas. O índice de consistência diminuiu com relação ao de referência até aproximadamente 20%. Em Souza (2007), também, é relatado uma diminuição de trabalhabilidade em concretos sem superplastificante (de 50 mm a 5 mm) em amostras com até 40% de adição de RPP. Só foi possível adicionar 50% de RPP quando 0,50% de superplastificante foi usado, tendo os traços de referência e adição de 50% de RPP abatimentos de 150 mm e 5 mm, respectivamente.

Como obtido na caracterização do RPP, a sua área superficial específica é bem superior ao do cimento, onde quanto maior a incorporação desse resíduo, maior quantidade de água foi necessária para envolver os grãos. Além disso, Santos (2008) e Zhong, Su e Zhao (2012) analisaram a morfologia do resíduo do polimento do porcelanato e constaram que suas partículas são irregulares e angulosas, podendo ocasionar redução da trabalhabilidade, visto que, o processo de deslizamento entre as partículas é prejudicado.

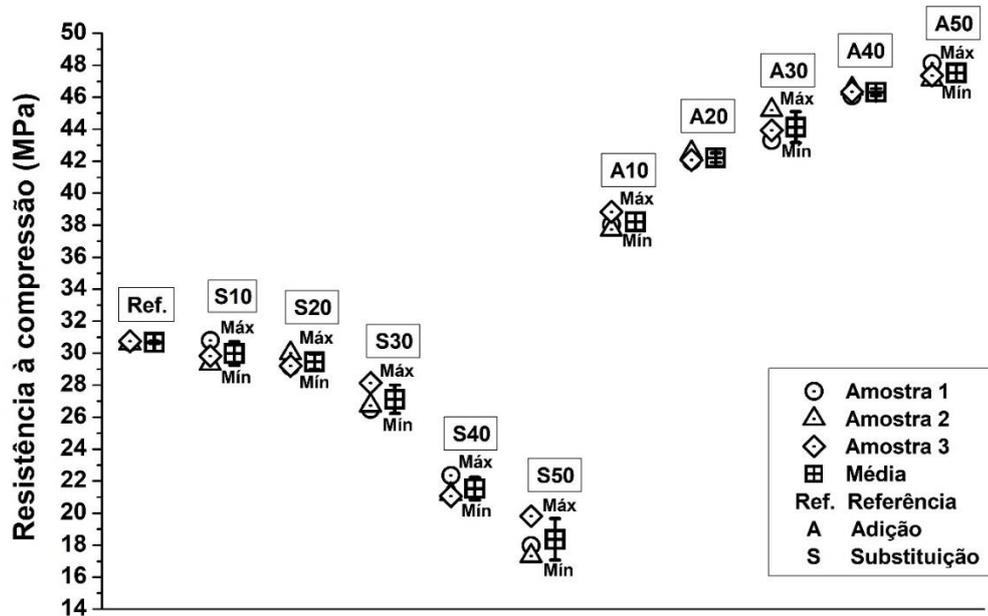
4.3 Ensaio no estado endurecido

4.3.1 Comportamento mecânico

4.3.1.1 Resistência à compressão

Os valores de resistência à compressão aos 7 dias para todos os traços são apresentados no Gráfico 11.

Gráfico 11 - Resultados da resistência à compressão aos 7 dias.



Fonte: O Autor (2019).

A resistência à compressão nas idades iniciais, para os traços com substituição, diminui à medida que aumenta a quantidade de RPP no concreto, devido a alteração na quantidade de areia na matriz, alterando a dinâmica de compactação da mesma. Embora o consumo de cimento tenha se mantido constante em metros cúbicos, a matriz foi alterada fisicamente.

A reatividade do RPP é apenas ativada em idades de cura mais longas. De fato, Jacoby e Pelisser (2015) notaram que maiores resistências foram alcançadas em idades mais avançadas, onde esse aumento foi proporcional à quantidade de RPP incorporada na composição, mostrando o efeito pozolânico do material.

A substituição parcial do cimento por RPP diminui a resistência média à compressão em 7 dias em 2,29% quando 10% do cimento foi substituído por RPP; 3,98% para o S20; 11,61% para S30; 29,80% para S40; e 40,12% para o S50. Pode-se observar, no Gráfico 11, que o valor da resistência à compressão para S10 e S20 é relativamente próximo ao de referência (levando em consideração as barras de desvio padrão), provavelmente relacionado às menores taxas de substituição associadas à ação de melhor empacotamento (WANG e TIAN, 2009; PELISSER,

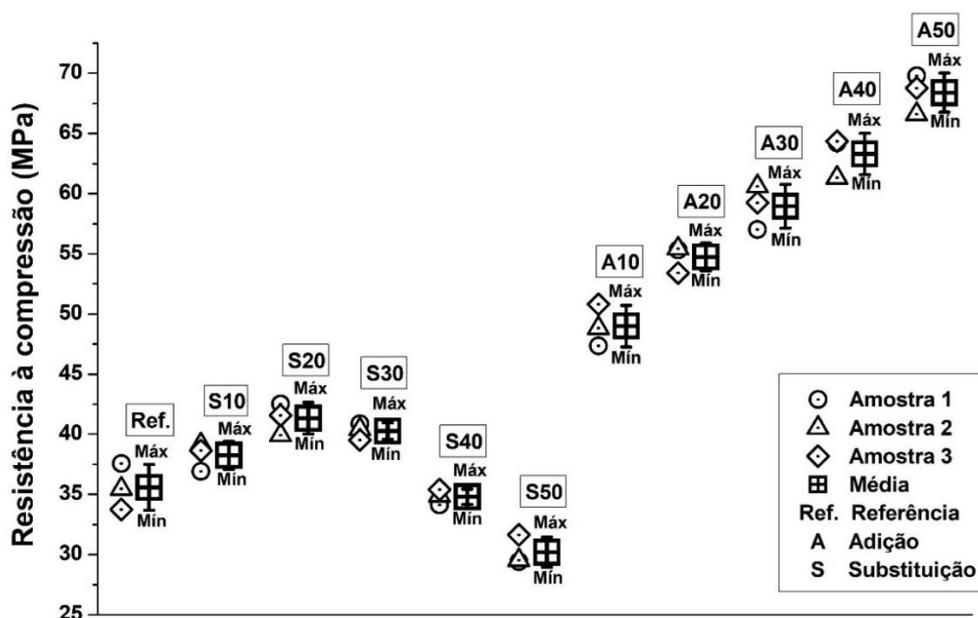
STEINER e BERNANDIN, 2012; JACOBY e PELISSER, 2015; BREITENBACH *et al.*, 2017).

Nos traços com adição de RPP, observou-se um comportamento inverso. A resistência à compressão aumentou à medida que se adicionou o RPP. Isso ocorreu, possivelmente, devido a melhor compactação dos traços com adição, pois a razão consumo de materiais pulverulento (cimento mais RPP) e consumo de agregados (miúdo mais gráudo) foram maiores para esses traços, mostrando assim o efeito filer do RPP nas primeiras idades. Fato também observado no trabalho de Souza (2007), em que a resistência à compressão aos 7 dias foi aumentada de modo proporcional a adição de RPP, comprovando seu potencial como material de enchimento.

A adição de RPP no concreto contribuiu para um aumento de resistência média à compressão aos 7 dias de 24,52% para 10% de RPP (A10); 37,59% para A20; 43,85% para A30; 50,98% para A40; e 54,95% para A50. Como pode ser observado, o aumento foi expressivo, atingindo resistência acima de 50 MPa para A40 e A50. Comparando os traços com adição e substituição parcial do cimento, com relação a resistência mecânica aos 7 dias, nota-se que o efeito filer acontece rapidamente, sendo importante para elementos de concreto que necessitem de uma rápida desmoldagem.

O comportamento aos 28 dias encontra-se exposto no Gráfico 12.

Gráfico 12 - Resultados da resistência à compressão aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2019).

Conforme observado no Gráfico 12, o concreto de referência atingiu valores de resistência à compressão aos 28 dias superiores a 30 MPa, certificando que o processo de dosagem adotado foi satisfatório, pois foi requerido um concreto C30 (f_{ck} de 30 MPa).

Os traços com substituição sofreram alterações aos 28 dias, obtendo valores mais altos de resistência média à compressão, em que foram alcançados para os concretos S10, S20 e S30 aumentos de 7,45%, 16,16% e 13,18%, respectivamente, quando comparados aos de referência. O concreto S40 apresentou comportamento de resistência similar ao do concreto sem RPP (referência), levando em consideração as barras de desvio padrão. Além disso, houve uma diminuição em torno de 15,15% quando 50% do cimento foi substituído por RPP.

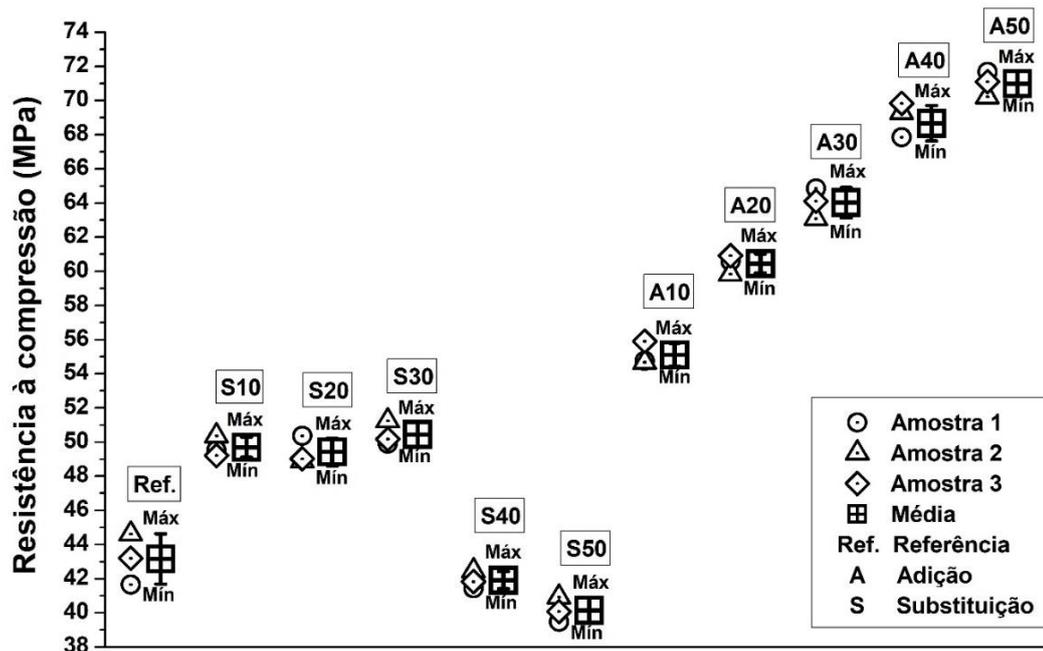
Aumentos significativos na resistência à compressão em 28 dias foram relatados em algumas pesquisas que substituíram o cimento por RPP (WANG e TIAN, 2009; PACHECO-TORGAL e JALALI, 2010; STEINER, BERNANDIN e PELISSER, 2015). Com relação a porcentagem de substituição, Steiner, Bernandin e Pelisser (2015) observaram melhora na resistência nas proporções de 10, 20 e 30% com relação ao de referência, onde substituição maiores que 30% tendeu a uma redução na resistência.

Os concretos com adição do resíduo do polimento do porcelanato (RPP) tiveram comportamento semelhante ao apresentado aos 7 dias, onde aumentou a resistência média à compressão com o aumento da adição de RPP. Foi obtido um aumento de 37,69% para A10; 53,79% para A20; 65,69% para A30; 77,89% para A40; e 92,22% para A50.

Nos trabalhos de Silva (2005) e Souza (2007), ambos com adição de RPP em concreto, constatou-se aumento de resistência mecânica nos concretos com adição de RPP. Souza (2007) avaliou a resistência aos 28 dias, onde o concreto com adição de 50%, utilizando superplastificante, obteve um aumento de 80,68% comparando com o concreto de referência. Outro dado importante, no trabalho de Souza (2007), foi a avaliação da resistência aos 28 dias nos traços com e sem aditivo, onde com a adição de 40% de RPP sem aditivo houve um aumento de 50,00%, já o mesmo teor de adição de RPP com superplastificante (SP) obteve um aumento de 71,98%. Logo, nota-se que o SP influenciou positivamente, provavelmente, devido a melhor dispersão das partículas de RPP, evitando com que elas se aglomerassem e, conseqüentemente, aumentando o número de pontos de nucleação.

Comportamento semelhante também foi observado para os 91 dias de cura com relação aos 28 dias, Gráfico 13, com valores médios de resistência à compressão maiores para S10 (>15,15%), S20 (>14,52%) e S30 (>16,88%) comparado ao concreto de referência. Da mesma forma, foi verificado valores médios de resistência semelhantes entre os concretos S40 e referência.

Gráfico 13 - Resultados da resistência à compressão aos 91 dias.



Fonte: O Autor (2019).

O concreto S50 manteve-se ainda com menor resistência de todos os traços, mas se deve ressaltar que a diminuição na resistência à compressão do concreto S50 foi de 40,12% aos 7 dias, 15,15% aos 28 dias e apenas 6,95% aos 91 dias, confirmando a reatividade do RPP. Pacheco-Torgal e Jalali (2010) também encontraram grandes diferenças nas idades iniciais de cura e menores diferenças nas idades de cura longas, trabalhando com substituições de cimento por RPP em concreto. Esse comportamento foi observado também em argamassa com substituição de cimento por RPP devido a ação pozolânica do resíduo (STEINER, BERNANDIN e PELISSER, 2015).

Nos traços com adição, assim como nas idades anteriores, foram maiores com relação ao concreto de referência, sendo 33,58% para A10; 48,61% para A20; 58,63% para A30; 71,69% para A40; e 78,25% para A50. Percebe-se que as porcentagens de

aumento de resistência aos 91 dias foram menores que aos 28 dias, essa tendência foi identificada por Souza (2007), onde constatou que o incremento de resistência para idades avançadas se torna mais discreto.

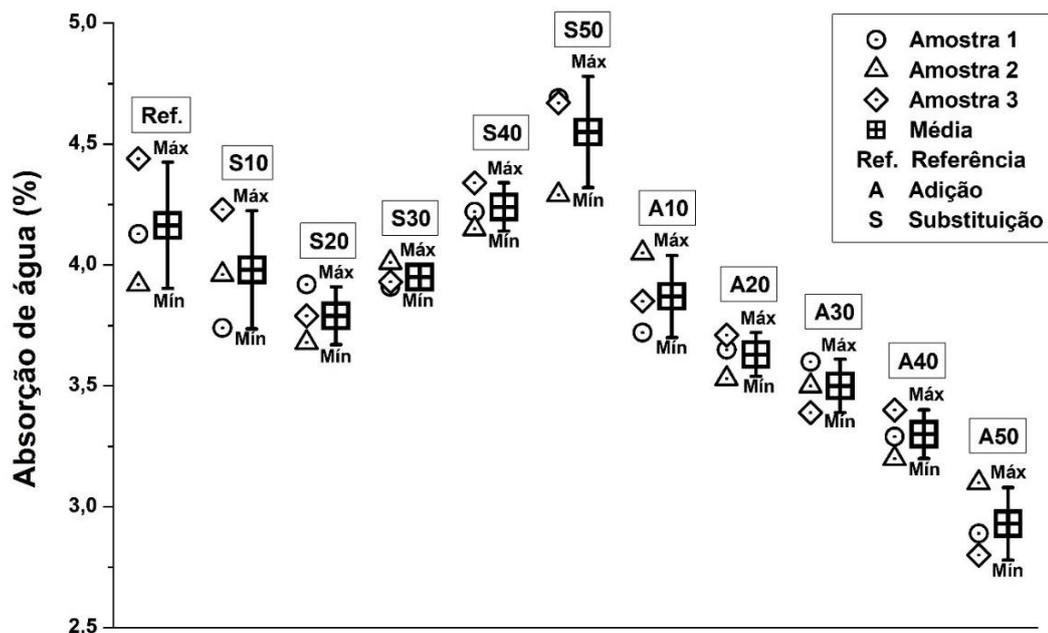
Portanto, com base nos dados obtidos, o RPP contribuiu significativamente para o aumento de resistência à compressão, devido sua reatividade e efeito fíler. Fato relatado por outros pesquisadores, que destacaram o efeito fíler (SILVA, 2005; SOUZA, 2007; WANG e TIAN, 2009; PELISSER, STEINER e BERNANDIN, 2012; STEINER, BERNARDIN e PELISSER, 2015; JACOBY e PELISSER, 2015; BREITENBACH *et al.*, 2017) e pozolânico (WANG e TIAN, 2009; PACHECO-TORGAL e JALALI, 2010; PELISSER, STEINER e BERNARDIN, 2012; STEINER, BERNARDIN e PELISSER, 2015; JACOBY e PELISSER, 2015).

4.3.2 Indicadores de durabilidade

4.3.2.1 Absorção de água por imersão

Os resultados obtidos de todos os traços são apresentados no Gráfico 14.

Gráfico 14 - Resultados da absorção de água aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2019).

Pode-se reparar que os valores foram inversamente proporcionais ao resultado de resistência à compressão aos 28 dias, confirmando a relação entre resistência e porosidade, ou seja, quanto maior a resistência menor é a porosidade.

Com relação aos traços de substituição parcial de cimento por RPP, S10, S20 e S30 apresentaram valores médios de absorção de água menores que o traço de referência, essa redução foi de 4,42% para S10; 8,98% para S20; e 5,14% para S30. Já o concreto S40 obteve resultado semelhante ao de referência, porém com um aumento de 1,83%. Por fim, o traço com 50% de substituição (S50) apresentou a maior absorção entre todos os traços, sendo 9,27% superior ao de referência.

Pacheco-Torgal (2010) realizaram a substituição do cimento pelo resíduo em 25% e notaram uma redução na absorção de água em concreto, onde esse comportamento deve estar relacionado à microestrutura mais densa proporcionada pela reação pozolânica entre o pó de porcelanato e o hidróxido de cálcio gerando o CSH secundário. Entretanto, foi constatado por Wang e Tian (2009), que grandes proporções de substituição de cimento por RPP, em argamassas, apresentaram maiores absorção de água; o mesmo foi observado por Penteado, Carvalho e Lintz (2016), onde houve aumento de absorção de água nos maiores percentuais de RPP substituindo o cimento em blocos de pavimentação, ainda segundo os autores, o aumento na absorção de água foi pequena não comprometendo a durabilidade do material.

Nos traços com adição, foi verificado uma diminuição na absorção de água à medida que aumentou a porcentagem de RPP. Tendo como base o concreto de referência, a diminuição foi de 7,06% para A10; 12,82% para A20; 15,95% para A30; 20,75% para A40; e 29,63% para A50.

Comportamento semelhante, foi identificado nos trabalhos de Silva (2005) e Souza (2007), onde à medida que adicionaram mais RPP, menor foi a absorção de água e porosidade. Silva (2005) ressalta que o RPP agiu como fíler promovendo maior refinamento na estrutura dos poros, devido sua dispersão na mistura, e maior preenchimento de vazios. Além disso, foi constatado que a granulometria descontínua entre o cimento e o RPP podem contribuir para a diminuição da porosidade (WANG e TIAN, 2009; WANG *et al.*, 2011; YUNHONG *et al.*, 2014; JACOBY e PELISSER, 2015). De acordo com Souza (2007), o aditivo superplastificante (SP) teve um efeito fundamental na absorção e porosidade, pois os concretos com esse aditivo tiveram

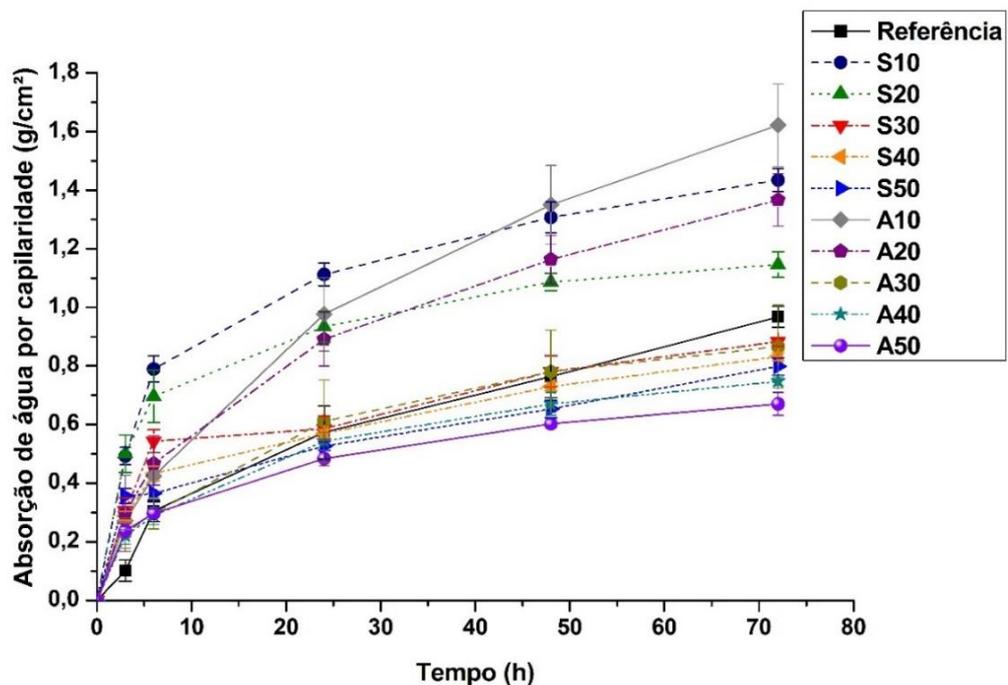
melhoramento dessas propriedades, se comparado com os que não tem superplastificante, em virtude do SP promover uma maior plasticidade.

Conclui-se que do mesmo modo que ocorreu na resistência mecânica, o RPP influencia melhorando a absorção de água devido a ação simultânea do melhor empacotamento (efeito fíler) e ação pozolânica.

4.3.2.2 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade aumentou à medida que passa o tempo e diminuiu conforme aumenta a quantidade de RPP na mistura, como pode ser visto no Gráfico 15.

Gráfico 15 - Resultados da absorção de água por capilaridade aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2019).

Outro dado observado, foi que tanto nos traços de substituição parcial do cimento como nos traços de adição apresentaram comportamento semelhantes, em que S10, S20, A10 e A20 tiveram maiores absorção de água por capilaridade que o concreto de referência. Esse aumento, às 72 horas, foi de 48,25% (S10), 18,42% (S20), 67,54% (A10) e 41,23% (A20).

De acordo com Breitenbach *et al.* (2017), a penetração da água é inversamente proporcional ao diâmetro dos capilares; portanto, o menor diâmetro das partículas do RPP possibilitou a formação de poros com diâmetros menores e conectados, aumentando a absorção capilar.

Constatações de que o RPP diminui o diâmetro médio dos poros são apresentados nos trabalhos de Silva (2005) e Wang e Tian (2009). Ambos avaliaram o diâmetro médio dos poros à medida que se incorporava o RPP, onde os resultados mostraram que o diâmetro médio dos poros diminuiu 55,18% para concreto com adição de 20% de RPP (SILVA, 2005), e 36,81% para argamassas com 30% de substituição parcial de cimento por RPP.

Entretanto, no Gráfico 15, verificou-se que teores maiores que 20%, tanto para adição como substituição, apresentaram diminuição da absorção de água por capilaridade com relação ao concreto de referência, sendo essa redução, às 72 horas, de 8,77% para S30; 14,04% para S40; 17,54% para S50; 10,53% para A30; 22,81% para S40; e 30,70% para A50.

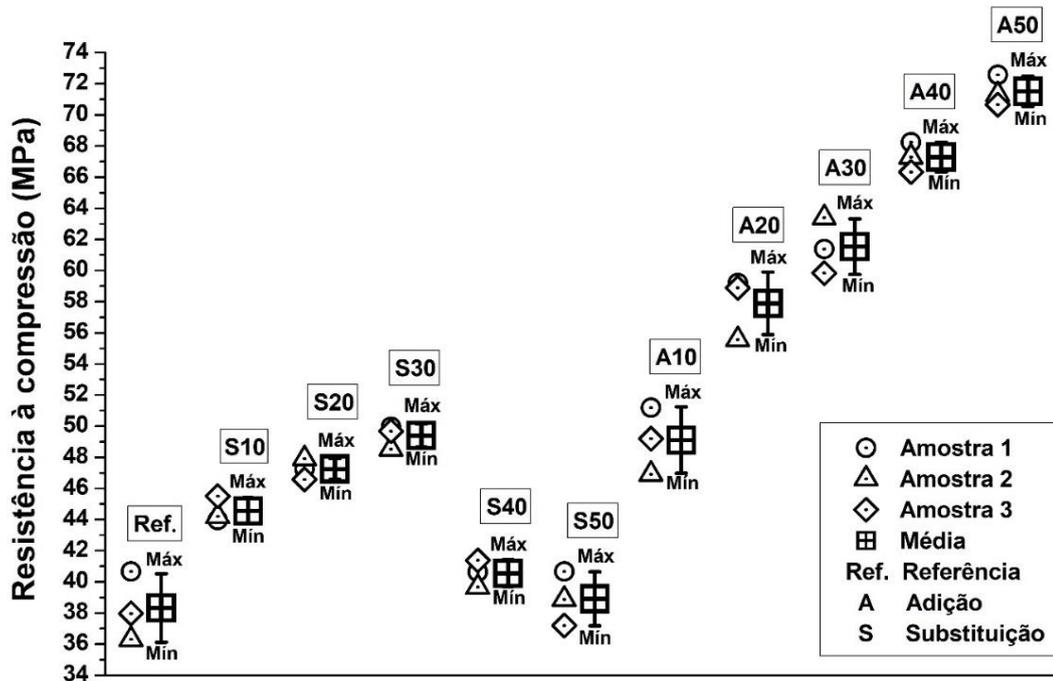
Desempenho semelhante foi obtido no trabalho de Breitenbach *et al.* (2017), em que teores de 5% a 20% de RPP apresentaram maiores absorções de água por capilaridade, e para teores superiores a 20% houveram diminuição considerável, onde o traço com 30% de RPP apresentou uma redução de 49,06% com relação ao traço com 20% do resíduo.

Provavelmente, o efeito de tortuosidade e/ou obstrução dos poros foram responsáveis por reduzir o progresso da absorção de água por capilaridade, quando mais RPP foi incorporado. Os resultados também concordam com Santos (2008) que estudou a incorporação de resíduos minerais, incluindo o RPP. Além disso, Pacheco-Torgal e Jalali (2010) também obtiveram resultados semelhantes, notaram que a absorção de água capilar nos concretos com incorporação de resíduos de porcelanato decresceu devido à ação de preenchimento dos poros e as reações pozolânicas.

4.3.2.3 Resistência à exposição ambiental

Os resultados da resistência à compressão dos concretos com exposição ambiental durante 5 meses são apresentados no Gráfico 16.

Gráfico 16 - Resultados da resistência à exposição ambiental de 5 meses.



Fonte: O Autor (2019).

O desempenho apresentado assemelhasse à resistência à compressão aos 91 dias. Entretanto, a maioria das amostras apresentou redução de resistência após exposição as intempéries, que contribuem para a degradação do concreto, onde se pode citar a ação da água, haja vista que durante o período de exposição ocorreram algumas chuvas na região.

De acordo com Halvorsen (1996), certos tipos de reações químicas causam alteração na pasta de cimento quando o concreto entra em contato com a água: dissolução e difusão das fases sólidas, reações entre uma solução externa e as fases sólidas e formação de produtos expansivos. Dentre essas reações com água, o processo de lixiviação é o mais conhecido e pode ser definido como o mecanismo que causa a descalcificação devido a dissolução de suas fases sólidas (EKSTRÖM, 2003). Devido a isso, Duchesne e Bertron (2013) afirmam que a lixiviação do CH promove a perda de massa, de alcalinidade e de resistência mecânica.

Avaliando os resultados adquiridos, com base no concreto de referência, foi constatado que os todos os concretos com substituição parcial do cimento e adição de RPP apresentaram valores de resistência média à compressão superiores. Para

os concretos com substituição, a resistência foi maior do que no concreto de referência em 16,29% (S10); 23,34% (S20); 28,92% (S30); 5,87% (S40); e 1,56% (S50).

Destaca-se também que, pela primeira vez, o concreto S50 obteve uma resistência semelhante ao de referência; provavelmente, em razão da hidratação de partículas do resíduo que reagiram ao longo do tempo, em virtude da reatividade do RPP com o hidróxido e cálcio gerando mais CSH.

Nos concretos com adição do RPP, a resistência média à compressão com relação ao concreto de referência foi superior em 28,16% para A10; 51,09% para A20; 60,61% para A30; 83,15% para A40; e 86,64% para A50. Do mesmo modo, percebe-se uma pequena diminuição na resistência média, nesse ensaio, com a que foi obtido aos 91 dias de cura úmida, exceto para os traços A40 e A50 que mantiveram os valores semelhantes, mesmo com a ação das intempéries.

Além da reatividade química, destacada anteriormente, um efeito positivo, para esse desempenho, foi ação fíler do RPP, em que como analisada nos ensaios de absorção de água e absorção de água por capilaridade apresentaram resultados satisfatórios, comprovando seu efeito na estrutura dos poros, que promove uma maior dificuldade no ingresso de agentes agressivos para o interior do concreto.

Outro dado interessante é a relação da resistência entre os próprios traços aos 91 dias de cura úmida com os expostos ao meio ambiente durante 5 meses, onde a maior perda de resistência foi encontrada justamente no traço de referência (< 11,22%); em contrapartida à medida que incorporou o RPP essa perda se tornou menor, S10 (< 10,35%); S20 (< 4,38%); S30 (< 2,07%); S40 (< 3,21%); S50 (< 3,10%); A10 (< 10,90%); A20 (< 4,25 %); A30 (< 3,88%); e aumentou-se para A40 (> 2,19%) e A50 (> 0,72%). Demonstrando assim o efeito positivo do RPP.

Resultados comprovando que os concretos com incorporação de resíduos de porcelanatos possuem uma ótima durabilidade foram, também, observados por Pacheco-Torgal e Jalali (2010), onde eles realizaram um ensaio de envelhecimento acelerado que simula a vida inteira da amostra de concreto através da realização de ciclos, condicionando as amostras para climas secos e úmidos provocando choque térmico, retratando um ambiente severo. Por fim, foi avaliada a resistência mecânica dos concretos antes e após o ensaio. Com isso, foi verificado que os concretos com resíduos apresentaram uma perda de resistência menor que o de referência, confirmando que o resíduo aumenta o desempenho com relação a durabilidade. Fato também relatado por Souza (2007).

4.3.2.4 Resistência ao ataque ácido

No ensaio de resistência ao ataque ácido foi avaliada a susceptibilidade dos concretos de referência e com incorporação de RPP intermediária (30%) e máxima (50%). Os resultados obtidos, em termos de perda de massa, encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados da perda de massa do ataque ácido.

| Ácidos | Acético | Clorídrico | Sulfúrico |
|------------|--------------------|------------|-----------|
| | Perda de massa (%) | | |
| Referência | 10,49 | 22,02 | 6,50 |
| S30 | 3,41 | 22,16 | 9,09 |
| S50 | 4,59 | 26,84 | 11,75 |
| A30 | 4,20 | 15,67 | 4,72 |
| A50 | 3,89 | 15,48 | 4,18 |

Fonte: O Autor (2019).

Com relação ao ataque por ácido acético, ambos os concretos com adição e substituição parcial do cimento por RPP apresentaram menores perdas de massa. De acordo com Oueslati e Duchesne (2012), os materiais cimentícios suplementares melhoram consideravelmente a durabilidade química submetido a uma solução de ácido acético.

Ainda segundo os autores, Oueslati e Duchesne (2012), a penetração da solução ácida no interior da matriz de cimento está diretamente ligada às propriedades de transporte do material cimentício, onde as adições minerais permitem uma diminuição do volume total de poros, bem como uma grande contribuição para o refinamento dos poros, conseqüentemente, promovendo uma baixa porosidade e alta compactação diminuindo a percolação da solução ácida através do material.

Pode-se perceber que esse efeito ocorreu nos concretos com incorporação de RPP, justificando a menor perda de massa com relação ao concreto de referência. Além disso, Oueslati (2011) relata que algumas adições melhoram a resistência química dos materiais cimentícios submetidos ao ácido orgânico devido às suas composições químicas que são ricas em silício, alumínio e ferro, que são resistentes em meio ácido e possuem baixo teor de cálcio (elemento mais lixiviável em uma solução ácida). Dessa forma, é comprovado outro fator que contribuiu para essa menor perda de massa, pois o RPP em questão possui em maior teor SiO_2 (64,317%) e Al_2O_3

(19,275%) e baixo teor de CaO (1,705%). Logo, é possível entender o porquê dos traços com incorporação de RPP serem mais resistentes que o traço de referência.

A perda de massa observada quanto foi utilizada o ácido clorídrico, também, foi semelhante ao anterior com relação aos traços com adição, já os com substituição S30 e S50 obtiveram perda de massa semelhante ao de referência. Notou-se que esse ataque ácido foi o mais degradante de todos. Como no ensaio anterior, o material que tem maior facilidade de ser lixiviado devido a ação do ácido clorídrico é o CH (DONATELLO, PALOMO e FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2013).

Logo, do mesmo modo que foi explicado anteriormente, o RPP contribui para redução da porosidade e do CH, melhorando a durabilidade do material. O único concreto com perda de massa um pouco maior, que o de referência, foi o S50 eventualmente em razão desse traço ter obtido uma porosidade maior, visto no ensaio de absorção de água.

O ácido sulfúrico foi o único que proporcionou perdas de massa diferente, em que os concretos de substituição parcial de cimento por RPP apresentaram as maiores perdas de massa; ao contrário dos traços com adição, que obtiveram as menores perdas.

Nesse ensaio, o componente mais afetado é a etringita, pois não é estável no ambiente de ácido sulfúrico (XIAO *et al.*, 2016). Portanto, as maiores perdas de massa verificadas nos traços com substituição podem ser em virtude do RPP, que possui como segundo maior componente químico, o óxido de alumínio (Al_2O_3), que é um dos elementos necessário para a formação da etringita. Com isso, a perda de massa à medida que aumenta a substituição pode ser devido a maior formação de etringita, ocasionando maior lixiviação e conseqüentemente maior perda de massa.

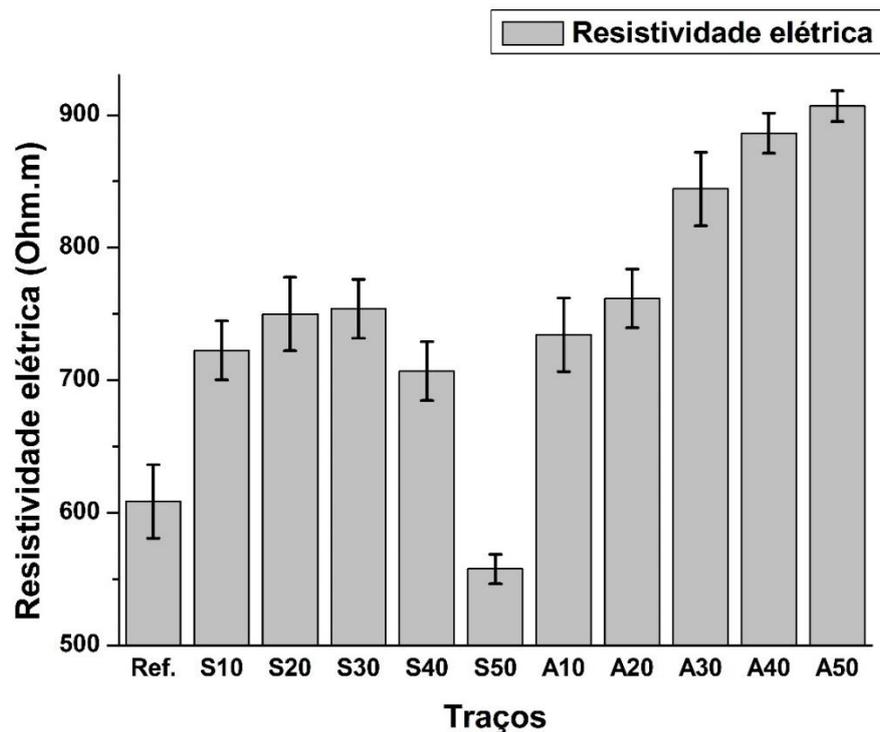
Já os traços com adição de RPP apresentaram as menores perdas de massa, podendo-se relacionar esse comportamento em razão da dificuldade da penetração do ácido para o interior da matriz cimentícia. Pois, como observado nos ensaios analisados, a adição de RPP promoveu a maior resistência mecânica e, conseqüentemente, a menor porosidade.

Yunhong *et al.* (2014) relata que o principal fator que favorece uma menor degradação do concreto com RPP é a possibilidade de um melhor empacotamento, pois reduz os vazios, impedindo a percolação do ácido em seu interior.

4.3.2.5 Resistividade elétrica

Os valores obtidos no ensaio de resistividade elétrica são apresentados no Gráfico 17. Primeiramente, destaca-se que todos os concretos dosados tiveram resultados de resistividade elétrica superiores a 200 Ohm.m, portanto suas taxas de probabilidade de corrosão são desprezíveis, conforme Metha e Monteiro (2014).

Gráfico 17 - Resultados da resistividade elétrica.



Fonte: O Autor (2019).

Percebe-se, ainda, que os dados apresentados são proporcionais aos valores de resistência mecânica aos 91 dias e inversamente proporcionais aos valores de absorção de água, indicando a grande influência da porosidade nessa propriedade.

De acordo com Safiuddin *et al.* (2010), a resistividade aumenta à medida que há diminuição e refinamento dos poros, pois o fluxo de íons é dificultado. Tendo como base o concreto de referência, os valores médios da resistividade elétrica dos traços de substituição parcial do cimento por RPP foram maiores em 18,71% para S10; 23,23% para S20; 23,87% para S30; e 16,13% para S40; a exceção foi S50 que, devido a maior porosidade, apresentou resultado menor em 8,37%.

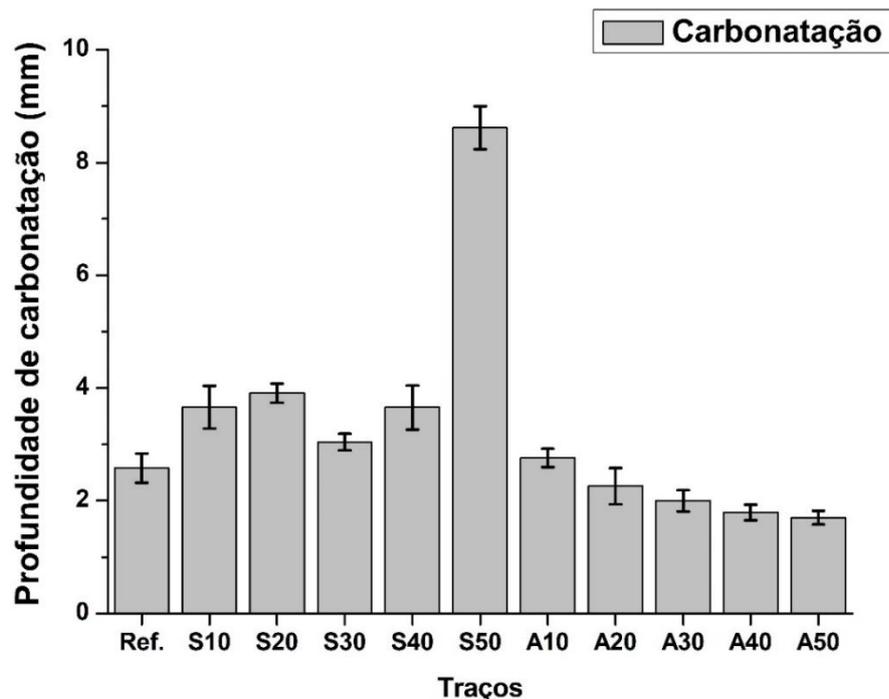
Nos traços com adição, todos apresentaram valores médios de resistividade elétrica superior ao de referência, sendo 20,65% para A10; 25,16% para A20; 38,71% para A30; 45,61% para A40; e 48,97% para A50. Observa-se que à medida que aumentou o teor de RPP na mistura, aumentou-se a resistividade elétrica, possivelmente, devido a menor porosidade no sistema.

Além da porosidade, outro fator que, provavelmente, contribuiu para maiores resistividades nos concretos com incorporação de RPP foi a reatividade pozolânica, que consome o CH em sua reação. Pois, Safiuddin *et al.* (2010) afirmam que as adições minerais podem reduzir os íons de hidroxila, que são um dos principais componentes responsáveis pelo transporte de carga. No caso do concreto S50, além da porosidade, o alto teor de RPP pode ter se aglomerado, minimizando a ação da reatividade pozolânica.

4.3.2.6 Profundidade de carbonatação

Os resultados da profundidade de carbonatação são expostos no Gráfico 18.

Gráfico 18 - Resultados da profundidade de carbonatação.



Fonte: O Autor (2019).

Foi constatado que todos os concretos com substituição parcial do cimento por RPP apresentaram maiores profundidades médias de carbonatação com relação ao concreto de referência, sendo 41,95% para S10; 51,71% para S20; 17,91% para S30; 41,82% para S40; e 234,20% para S50.

Comportamento semelhantes também foi verificado por Yunhong *et al.* (2014), em que foi verificado que os concretos com incorporação de RPP possuem menores teores de CH na mistura, diminuindo ainda mais devido a ação pozolânica do RPP. Com isso, esses concretos tem a alcalinidade reduzida, resultando em uma diminuição na resistência à carbonatação do concreto.

Ainda segundo o autor, a porosidade também tem uma influência significativa, onde é através dos vazios que o CO₂ ingressa e se difunde no concreto. Com isso, pode-se associar a maior profundidade de carbonatação no traço S50, que apresentou maior porosidade.

Em contrapartida, mesmo os demais traços de substituição apresentando menor porosidade que o de referência, está de acordo com Yunhong *et al.* (2014), que mostra em sua pesquisa que, nos concretos com RPP substituindo parcialmente o cimento, a atividade química foi mais significativa que o efeito fíler, por isso, a carbonatação foi maior nos traços com substituição parcial do cimento por RPP.

No caso dos traços com adição de RPP, apenas o traço com adição de 10% (A10) apresentou maior valor médio de carbonatação (>7,05%) que o de referência. Entretanto, considerando a barra de desvio padrão, ambos têm comportamento semelhantes.

Já nos demais traços, todos apresentaram profundidade de carbonatação inferior ao de referência, A20 (<12,28%), A30 (<22,56%), A40 (<30,45%) e A50 (<33,94%). De modo contrário aos traços com substituição parcial do cimento, na adição de RPP o efeito fíler foi o mecanismo mais preponderante para o resultado da profundidade de carbonatação, se comparado a atividade pozolânica do material, pois mesmo havendo a reação pozolânica nos traços com adição de RPP, o efeito fíler impediu a entrada de CO₂ pelos vazios.

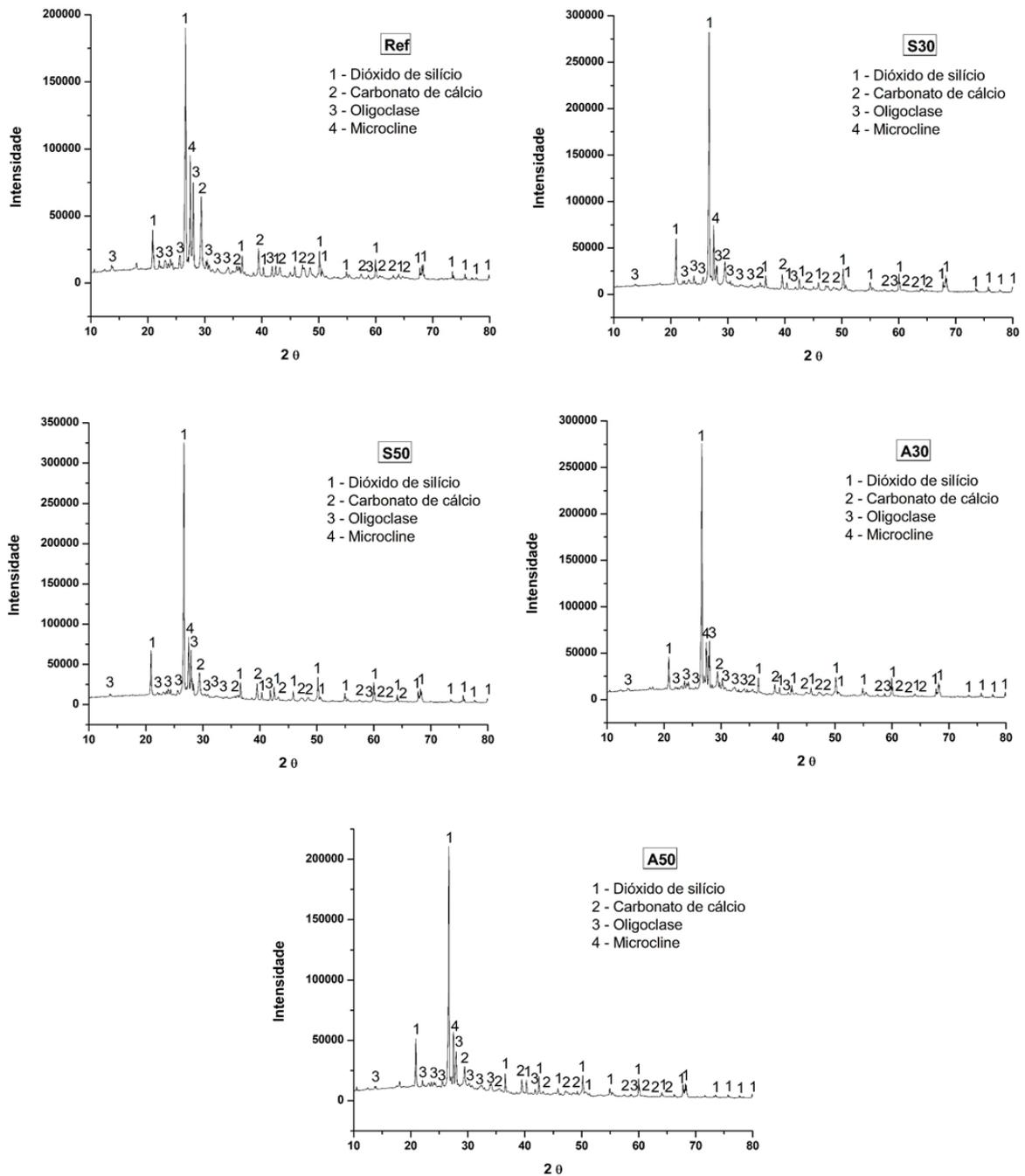
Fato comprovado, pelo ensaio de absorção de água, onde foi apresentado os menores valores, além das maiores resistências à compressão, indicando maiores impermeabilidades.

4.4 Análise cristalográfica e térmica

4.4.1 Difração de Raios-X do concreto

Os difratogramas de Raios-X são apresentados no Gráfico 19.

Gráfico 19 - Difratogramas de raios-X dos concretos analisados.



Fonte: O Autor (2019).

Ao analisar os difratogramas dos concretos quando da adição do RPP ao sistema, ou substituição do cimento pelo RPP (S30, S50, A30 e A50), comparativamente ao concreto de referência, após 91 dias em cura úmida seguida de 1 ano e meio em cura ambiente, verifica-se que foram identificados para todos os concretos: quartzo, carbonato de cálcio, oligoclase ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) e microcline (KAlSi_3O_8). Não foram observadas alterações nas fases de concreto quando da presença do RPP.

Constatou-se que a intensidade do maior pico de quartzo ($26,62^\circ$) foi diferente entre os tipos de concreto, sendo 190235 para referência; 282235 para S30; 325608 para S50; 275918 para A30; e 210668 para A50. Com isso, nota-se que todos os concretos com a incorporação do RPP apresentaram intensidades maiores, provavelmente, devido ao RPP ser rico em sílica.

De modo inverso, foi observado que o pico de maior intensidade de carbonato de cálcio ($29,40^\circ$) reduziu com a incorporação de RPP no sistema. Os concretos apresentaram intensidade de 64491 para referência; 35445 para S30; 40348 para S50; 30387 para A30; 28123 para A50.

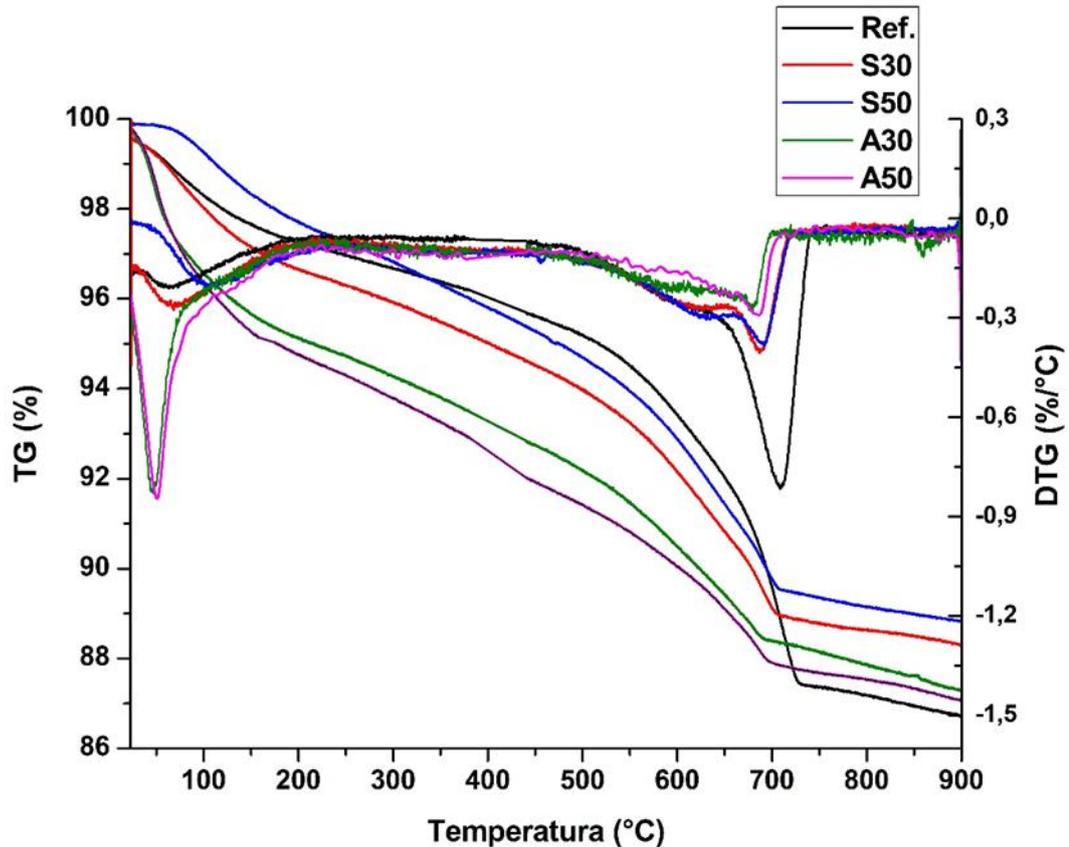
Além disso, observa-se, nos concretos com RPP, que a intensidade desse pico foi inversamente proporcional a resistência à compressão, podendo essa correlação ser justificada pela atividade pozolânica que contribui para o aumento de resistência nos concretos em idades avançadas.

Como as amostras utilizadas, nesse ensaio, estavam a mais de um ano e meio em cura ambiente, o hidróxido de cálcio (CH) provavelmente foi transformado em carbonato de cálcio devido a ação do CO_2 . Logo, o mesmo comportamento foi observado no trabalho de Yunhong *et al.* (2014), em que foi realizado o DRX em pasta cimentícias, em cura úmida, com e sem incorporação de RPP e constatou que o pico de CH foi menor quando o RPP estava no sistema devido ao efeito pozolânico, por causa do consumo do CH na reação pozolânica.

4.4.2 Termogravimetria do concreto

A análise termogravimétrica (TG/DTG) dos concretos (referência, S30, S50, A30 e A50), após 91 dias em cura úmida, seguida de 1 ano e meio em cura ambiente, é apresentada no Gráfico 20.

Gráfico 20 - Termogravimetria dos concretos analisadas.



Fonte: O Autor (2019).

Observa-se dois picos, o primeiro pico que está contido na faixa 20°C ~ 385°C, refere-se às decomposições do C-S-H e das fases aluminato hidratadas, podendo ser designada por perda de água quimicamente combinada – AQC (PILAR *et al.*, 2016; HOPPE FILHO *et al.*, 2017). A faixa 385°C ~ 900°C, que contém o segundo pico, corresponde à decomposição do carbonato de cálcio contido na pasta.

Nota-se que nas amostras em questão, não foi identificado o pico característico, próximo a 400°C, referente ao hidróxido de cálcio (PILAR *et al.*, 2016; HOPPE FILHO *et al.*, 2017). Isso é devido ao tempo em que as amostras ficaram em cura ambiente, em que sofreram o efeito da carbonatação, também observado nos difratogramas de raios-X.

As perdas de massa em cada faixa e a perda de massa total para os traços analisados são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Perdas de massa (TG/DTG) das pastas analisadas.

| Atribuição | Temperatura | Ref. | S30 | S50 | A30 | A50 |
|-------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AQC | 20°C~385°C | 3,82% | 4,84% | 4,03% | 6,56% | 7,13% |
| CaCO ₃ | 385°C~900°C | 9,47% | 6,86% | 7,14% | 6,15% | 5,82% |
| | Total | 13,29% | 11,70% | 11,17% | 12,71% | 12,95% |

Fonte: O Autor (2019)

Pode-se observar que, com a incorporação do RPP, as perdas por AQC apresentaram valores maiores, se comparado com a amostra de referência, sendo este aumento de 26,70% para S30; 5,50% para S50; 71,73% para A30; e 86,65% para A50. Isso sugere, possivelmente, que o resíduo do polimento do porcelanato (RPP) apresentou uma reatividade pozolânica, pelo incremento de água quimicamente combinada. Segundo Hoppe Filho *et al.* (2017), materiais cimentícios com adições ativas tendem a apresentar maiores teores de AQC devido à ação da pozolana.

Fato esse observado no ensaio de resistência à compressão do concreto, aos 91 dias, em que os concretos S30, A30 e A50 apresentaram resistência superior ao de referência; já o S50 apresentou resistência semelhante, tendo o valor de AQC próximo ao de referência, possivelmente, devido a uma aglomeração do RPP que ocasionou uma diminuição na ação de reatividade pozolânica, visto que, ele apresentou a menor trabalhabilidade.

Com relação à faixa de decomposição do carbonato de cálcio, verificou-se que as perdas apresentadas foram inversamente proporcionais à faixa referente a AQC. Todas as amostras analisadas com a incorporação do RPP obtiveram perda de massa menor que a de referência. Como as amostras sofreram o efeito da carbonatação, o CH transformou-se em CaCO₃; logo, a faixa de decomposição do carbonato de cálcio é composta pelo CaCO₃, comumente encontrado no material, mais o CaCO₃ oriundo da transformação do CH.

O teor de dióxido de carbono foi quantificado pela perda de massa ocorrida entre 385 e 900°C que, ao ser multiplicado por 2,27, conforme descrito no subitem 3.7.2, indica o teor de carbonato de cálcio contido na pasta. Ao quantificar, verificou-se que a perda foi mais significativa, sendo 21,50% para referência; 15,57% para S30; 16,21% para S50; 13,96% para A30; e 13,21% para A50.

Essa diminuição pode ser entendida da seguinte forma: como o material, RPP, possui certa reatividade pozolânica, uma parcela do CH foi transformada em CSH,

indicando o motivo da maior perda de água quimicamente combinada; já a outra parcela, foi carbonatada. Tendo assim, menor perda de massa nessa faixa.

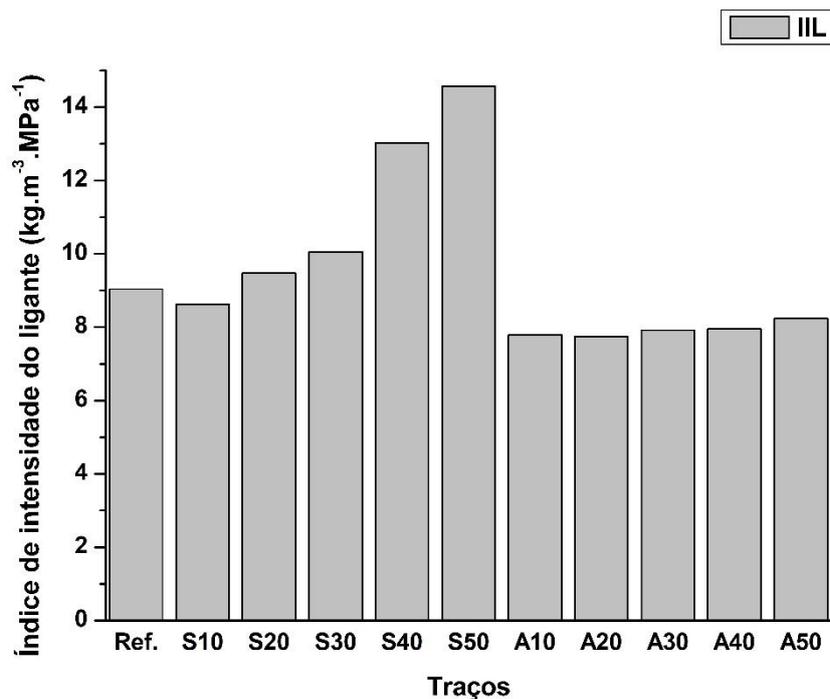
Portanto, observou-se que quanto maior o teor de AQC menor foi o teor de carbonato de cálcio, indicando que o RPP possui reatividade pozolânica. Resultados semelhantes, através de análises de TG e DTG, foram obtidos nos trabalhos de Pelisser, Steiner e Bernardin (2012); Jacoby e Pelisser (2015); e Steiner, Bernardin e Pelisser (2015), em que foi observado o efeito pozolânico nas pastas com a incorporação de RPP, com maior perda de água quimicamente combinada e menor perda de massa na faixa correspondente ao hidróxido de cálcio, visto que, suas amostras estavam em cura úmida, sem efeito da carbonatação.

4.5 Análise de emissão de CO₂

4.5.1 Índice de Intensidade do Ligante (IIL)

Os valores obtidos do Índice de Intensidade do Ligante (IIL), de cada traço aos 91 dias, são apresentados no Gráfico 21.

Gráfico 21 - Resultados do índice de intensidade do ligante.



Fonte: O Autor (2019).

Conforme os valores obtidos, expostos no Gráfico 21, com relação aos traços com substituição, o S10 foi o único que apresentou redução de IIL, sendo de 4,48% com relação ao índice de intensidade do ligante do concreto de referência. Com isso, observa-se que a substituição até 10% de cimento por RPP mostrou-se mais eficiente.

Considerando a mesma comparação, os demais traços apresentaram valores de IIL maiores, sendo 4,79% para o S20; 11,23% para o S30; 44,17% para S40 e 61,21% para S50. Esses altos índices de ligante, com o aumento da substituição, já eram esperados, pois adições menos reativas aumentam os valores de IIL. Logo, como o RPP não foi classificado como pozzolânico, sua reatividade é um pouco mais baixa se comparado às pozzolanas.

Nos traços com adição foi observado que, em todos os concretos, a eficiência do ligante foi aumentada, ou seja, resultou na redução do IIL do traço de referência ($9,04 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$), onde essa redução foi de 13,86% para A10; 14,34% para A20; 12,37% para A30; 12,01% para A40; e 8,83% para A50.

Matos *et al.* (2018b) realizou, em sua pesquisa, uma análise do Índice de Intensidade do Cimento (IIC), que é a razão do consumo de cimento pela resistência à compressão obtida, ou seja, desconsidera-se o consumo de outros ligantes na mistura, em concreto autoadensável, com substituição parcial do cimento por RPP, e obteve-se no teor máximo de substituição (30%) uma redução de IIC igual a 18,46%.

Caso fosse adotado o IIC, o traço S30 do trabalho em questão teria o valor de $7,73 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$, atingindo uma redução de 14,44%, com relação ao concreto de referência (IIC igual a $9,04 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$). Logo, a redução do IIC da referida pesquisa seria próxima ao obtido por Matos *et al.*, (2018b). Comprovando o bom desempenho do RPP em matrizes cimentícias.

4.5.2 Potencial de Aquecimento Global (PAG)

Considerando a resistência à compressão de 54 MPa, que corresponde à média da resistência à compressão dos concretos aos 91 dias, e o IIL obtido na análise anterior aos 91 dias. Os valores do Potencial de Aquecimento Global (PAG) para todos os traços são expostos na Tabela 18.

Os resultados nos mostram o consumo de materiais de cada traço para obter uma resistência à compressão de 54 MPa. Observa-se que o valor do IIL é proporcional ao consumo de ligante, logo os traços com menores IIL obtiveram

menores consumos de ligante. Como o cimento possui maior emissão equivalente de CO₂ entre os constituintes do concreto, conseqüentemente, maior serão os valores de Potencial de Aquecimento Global (PAG) para os traços com maiores consumos desse material.

Tabela 18 - Resultados do potencial de aquecimento global.

| Traço | II _L (kg.m ⁻³ . MPa ⁻¹) | Ligante (kg/m ³) | Cimento (kg/m ³) | RPP (kg/m ³) | PAG (CO ₂ - eq/m ³ de concreto) | Redução de PAG |
|-------|---|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---|-------------------|
| Ref | 9,04 | 488,02 | 488,02 | 0,00 | 564,01 | 0,00% |
| S10 | 8,63 | 466,17 | 419,55 | 46,62 | 494,17 | -12,38% |
| S20 | 9,47 | 511,39 | 409,11 | 102,28 | 492,96 | -12,60% |
| S30 | 10,05 | 542,82 | 379,97 | 162,85 | 473,05 | -16,13% |
| S40 | 13,03 | 703,56 | 422,14 | 281,42 | 545,99 | -3,20% |
| S50 | 14,57 | 786,72 | 393,36 | 393,36 | 534,38 | -5,25% |
| A10 | 7,78 | 420,40 | 382,18 | 38,22 | 443,37 | -21,39% |
| A20 | 7,74 | 418,05 | 348,38 | 69,68 | 405,52 | -28,10% |
| A30 | 7,92 | 427,67 | 328,98 | 98,69 | 384,19 | -31,88% |
| A40 | 7,95 | 429,40 | 306,71 | 122,68 | 359,38 | -36,28% |
| A50 | 8,24 | 444,94 | 296,63 | 148,31 | 348,66 | -38,18% |

Fonte: O Autor (2019).

Conforme a Tabela 18, todos os traços com incorporação do RPP, adição e substituição, apresentaram redução do PAG com relação ao traço de referência, pois obtiveram menores consumos de cimento. Apesar dos traços apresentarem diferentes consumos dos demais componentes (RPP, agregados e SP), o que teve maior influência no resultado final foi o consumo de cimento.

Além da incorporação do RPP contribuir para a diminuição do consumo de cimento. Outro fator importante é que, segundo John (2011), resíduos são praticamente neutros em emissões de CO₂, reduzindo a intensidade de emissões e, conseqüentemente, o potencial de aquecimento global.

Foi observado também que os traços com adição apresentaram as maiores reduções de PAG, obtendo-se até 38,8% de redução para o A50. Com isso, o uso de RPP é uma solução satisfatória do ponto de vista ambiental, além de melhorar algumas propriedades do concreto como analisados anteriormente. Resultado semelhante, também, foi observado por Matos *et al.* (2018b), em que se constatou que a incorporação do resíduo do polimento do porcelanato reduz o potencial de aquecimento global.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos foram promissores para concretos com adição e material cimentício suplementar – MCS (substituição parcial do cimento) pelo resíduo do polimento do porcelanato (RPP) na produção de concretos sustentáveis, resistentes e duráveis.

- O RPP apresentou características físico-químicas adequadas para a incorporação em materiais cimentícios, com reatividade pozolânica, mas não sendo classificado como pozolana.

- Houve redução na trabalhabilidade tanto nos traços de adição como MCS, com correções com superplastificante, melhorando as dispersões das partículas.

- Em termos de substituição parcial do cimento por RPP, apesar da resistência à compressão média ter reduzido aos 7 dias, os valores aumentaram aos 28 dias e 91 dias (exceto para o S50). No entanto, o patamar de redução no traço S50 foi menor à medida que o tempo aumentou, indicando a reatividade pozolânica do RPP.

- A adição de RPP no concreto obteve um grande efeito fíler, contribuindo para um aumento de resistência média à compressão em até 50,98% (A40) aos 7 dias, 92,22% (A50) aos 28 dias e 78,25% (A50) aos 91 dias.

- Os resultados de absorção de água por imersão e capilaridade comprovam o refinamento da matriz porosa, exceto para o traço com 50% de substituição (S50). Nos traços com adição, foi verificado uma diminuição gradual na absorção de água à medida que aumento a porcentagem de RPP.

- Após cinco meses de exposição ambiental, todos os concretos com substituição parcial do cimento e adição de RPP apresentaram valores de resistência média à compressão superiores aos de referência. Outro dado interessante é a relação da resistência entre os próprios traços aos 91 dias de cura úmida com os expostos ao meio ambiente durante 5 meses, onde a maior perda de resistência foi encontrada justamente no traço de referência (< 11,22%).

- Com relação ao ataque por ácido acético, ambos os concretos com adição e substituição parcial do cimento por RPP apresentaram menores perdas de massa. Os traços com adição foram mais promissores, reduzindo a perda de massa nos três ácidos avaliados, em relação ao concreto de referência.

- Em termos de resistividade elétrica, todos os concretos dosados tiveram resultados de resistividade elétrica superiores a 200 Ohm.m, portanto suas taxas de

probabilidade de corrosão são desprezíveis. O único concreto que obteve resultado de resistividade inferior ao de referência foi o S50, devido a maior porosidade, onde essa redução foi de 8,37%. Já o concreto com maior resistividade foi o A50, apresentado um aumento de 48,97% com relação ao de referência.

- Foi constatado que todos os concretos com substituição parcial do cimento por RPP apresentaram maiores profundidades médias de carbonatação com relação ao concreto de referência, em razão da atividade pozolânica. Em contrapartida, os concretos com adição, exceto A10 que apresentou valores semelhantes, obtiveram profundidades de carbonatação inferiores ao de referência, pois esses concretos apresentaram menores porosidades.

- Na análise microestrutural, foi verificado que as fases cristalográficas apresentaram os mesmo picos, independente do tipo da pasta do concreto. Com relação ao TG/DTG, constatou-se que o RPP possui reatividade pozolânica, mesmo não sendo classificado como material pozolânico pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

- Para uma resistência à compressão de 54 MPa aos 91 dias, o uso de RPP reduziria a emissão de CO₂ equivalente de 564,01 kg CO₂-eq/m³ de concreto (Ref) para 473,05 kg CO₂-eq/m³ de concreto (30% de substituição) e para 348,66 kg CO₂-eq/m³ de concreto (50% de adição). Demonstrando que o uso do RPP é uma solução satisfatória do ponto de vista ambiental.

Como um todo, os resultados permitem concluir que o resíduo do polimento do porcelanato (RPP) tem grande potencial para utilização em concreto. Na comparação de sua utilização como adição e material cimentício suplementar, o efeito fíler é mais acentuado quando utilizado como adição, apresentado-se maiores resistências nas idades iniciais e menores vazios. No caso de sua utilização como MCS, há efeito fíler, porém em menor intensidade, tendo como mecanismo mais preponderante, provavelmente, a atividade pozolânica.

REFERÊNCIAS

- ANDRIOLO, F. R. **Construções de concreto**. São Paulo: Pini, 1984. 738 p.
- ARAUJO, S. C. J. F. N. **Análise de microestrutura e de características geotécnicas de misturas de resíduo de polimento de porcelanato e solo**. 2016. 114p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC). UFRN, Natal.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

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

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

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

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

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

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

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

BEDDOE, R. E.; DORNER, H. W. **Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms**. Cement and Concrete Research, v. 35, p. 2333–2339, 2005.

BERNARDIN, A. M.; SILVA, M. J.; CARVALHO, E. F. U.; RIELLA, H. G. **Cerâmicas Celulares Obtidas a partir de Resíduos de Polimento**. Cerâmica Industrial, v. 12, n. 1/2, p. 31-35, 2007.

BERODIER, R.; GIBSON, L. R.; BURNS, E.; ROBERTS, L.; CHEUNG, J. **Robust production of sustainable concrete through the use of admixtures and in-transit concrete management systems**. Cement and Concrete Composites, v. 30, p. 1-15, 2018.

BITTENCOURT, E. L.; BENICÁ, E. **Aspectos superficiais do produto grês polido**. Cerâmica Industrial, v. 7, n. 4, jul./ago. 2002.

BREITENBACH, S. B. **Desenvolvimento de argamassa para restauração utilizando resíduo do polimento do porcelanato**. 2013. 180p. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), UFRN, Natal.

BREITENBACH, S. B.; SANTOS, O. C.; ANDRADE, J. C. S.; NASCIMENTO, R. M.; MARTINELLI, A. E. **Adição de resíduo do polimento de porcelanato em argamassas de restauro à base de cal**. *Cerâmica*, v. 63, p. 395- 401, 2017.

CAETANO, A. L. A.; BARBOSA NETO, M. C.; FULGÊNCIO, E. B. G.; MACEDO, D. A.; FERREIRA, H. S.; DUTRA, R. P. S. **Caracterização do resíduo provindo do polimento do porcelanato submetido ao processo de hidrociclonagem**. In: 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal – RN, 06 a 10 de Novembro de 2016.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas. **Boletim técnico da escola politécnica da USP**, São Paulo, BT/BBC/237, 1999.

CASSAGNABÈRE, F.; MOURET, M.; ESCADEILLAS, G.; BROILLIARD, P.; BERTRAND, A. **Metakaolin, a solution for the precast industry to limit the clinker content in concrete: mechanical aspects**. *Construction and Building Materials*, v. 24, p. 1109–1118, 2010.

CELIK, K.; MERAL, C.; GURSEL, A. P.; MEHTA, P. K.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. **Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of selfconsolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder**. *Cement and Concrete Composites*, v. 56, p. 59–72, 2015.

CHATVEERA, B.; LERTWATTANARUK, P. **Evaluation of nitric and acetic acid resistance of cement mortars containing high-volume black rice husk ash**. *Journal of Environmental Management*, v. 133, 365-373, 2014.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, v. 2, cap. 8, p. 1946, 2011.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. **Measuring the eco-efficiency of cement use**. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Anuário Mineral Brasileiro**. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/anuario-mineral-brasileiro-2010>>. Acesso em: 18 de dezembro de 2017.

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

DONATELLO, S.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. **Durability of very high volume fly ash cement pastes and mortars in aggressive solutions**. *Cement and Concrete Composites*, v. 38, p. 12–20, 2013.

DUCHESNE, J.; BERTRON, A. **Leaching of cementitious materials by pure water and strong acids (HCl and HNO₃)**, in: M. Alexander, A. Bertron, N. De Belie (Eds.), *Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments*, Springer, Berlin, 2013.

EKSTRÖM, T. **Leaching of concrete: The Leaching Process and its Effects** (Ph.D. thesis), Lund University, Suécia, 2003.

FLOWER, D. J. M.; SANJAYAN, J. G. **Green house gas emissions due to concrete manufacture**. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 12, p. 282–288, 2007.

GIAMMUSSO, S. E. **Manual do concreto**. Ed. São Paulo: Pini, 1992.

GUEDERT, L. O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca de arroz como material pozolânico**. 1989. 147p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, UFSC. Florianópolis.

HALVORSEN, U. A. **Corrosion of Steel and Leaching of Lime Near Cracks in Concrete Structures**. Lund University, Suécia, 1966.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; TANAKA, R. S.; MEDEIROS, M. H. F. **Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG)**. Revista Matéria, v.22, n.3, 2017.

ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, v. 2, cap. 8, p. 1946, 2011.

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

JIN, R. CHEN, Q. SOBOYEJO, A. **Survey of the current status of sustainable concrete production in the U.S**. Conservation and Recycling, v. 105, p. 148–159, 2015.

JOHN, V. M. Concreto sustentável. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 1843-1869, 2011.

LAVAGNA, L.; MUSSO, S.; FERRO, G.; PAVESE, M. **Cement-based composites containing functionalized carbon fibers**. Cement and Concrete Composites, v. 88, p. 165-171, 2018.

LEE, C. Y.; WANG, S. R. **Application of four-electrode method to analysis resistance characteristics of conductive concrete**, World Academy of Science, Engineering and Technology, v. 4, p. 77-80, 2010.

LEWIS, C. S. **Selected Literary Essays**. Cambridge University Press, 2013.

LIMA, E. E. P. **Concreto auto adensável produzido com resíduo de polimento do porcelanato – comportamento em relação à corrosão de armaduras**. 2015. 93p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), UFPB, João Pessoa.

LIU, R.; DURHAM, S. A.; RENS, K. L.; RAMASWAMI, A. **Optimization of cementitious material content for sustainable concrete mixtures**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 24, p. 745–753, 2012.

MARQUES, L. N.; MENEZES, G. A.; NEVES, G. A.; SANTANA, N. L.; LIRA, H. L.; FERREIRA, H. C. **Re-aproveitamento do resíduo do polimento de porcelanato para utilização em massa cerâmica**. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 2.2, p. 34-42, 2007.

MASSAZZA, F. Pozzolana and Pozzolanic Cements. In: Hewlett, P.C. (ed.), **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 4. ed. London: Arnold Publisher, p. 485-500, 1998.

MATOS, P. R.; OLIVEIRA, A. L.; PELISSER, F.; PRUDÊNCIO JR, L. R. **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.; PRUDÊNCIO JR., L. R.; OLIVEIRA, A. L.; PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P. **Use of porcelain polishing residue as a supplementary cementitious material in self-compacting concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 193, p. 623–630, 2018b.

MEDEIROS, V. B. R.; LIMA, E. E. P.; CARVALHO, C. M.; SOBRINHO JR, A. S. **Concreto sustentável produzido com resíduo de porcelanato: Análise de durabilidade por carbonatação**. *Revista Ciência e Tecnologia, Campinas*, v. 21, n. 38, p. 17-24, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1 ed. São Paulo: Pini, 573p, 1994.

MORAIS, M. L. V. N. **Aproveitamento de resíduo de beneficiamento do caulim na produção de porcelanato cerâmico**. 2007. 152p. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), UFRN, Natal.

NASCIMENTO, J. E. M. F. **Avaliação dos efeitos da substituição da cal hidratada por cinzas de algaroba em argamassas de revestimento**. 2014, 99p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), UFPE, Caruaru

NASCIMENTO, M. V. L. A. **Estudos de blocos intertravados de concreto para pavimentação com incorporação de resíduo de porcelanato**. 2016. 96p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), UFPE, Caruaru.

NAZARI, A.; SANJAYAN, J. G. (Editores) **Handbook of Low Carbon Concrete**. 1a. ed. Elsevier, 2017.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. London: Longman scientific & technical, 1994.

OLIVEIRA, E. M.; OLIVEIRA, E. M.; PETERSON, M.; PELISSER, F.; OLIVEIRA, C. M.; ANTUNES, E. G. P. **Efeito da Adição do Resíduo do Polimento de Porcelanato – RPP na Durabilidade de Argamassa de Revestimento**. Cerâmica Industrial, v. 23, n. 4, p. 42-49, 2018.

OUESLATI, O. **Durabilité des matériaux cimentaires soumis aux acides organiques. Résistance chimique, mécanique et de corrosion**, Thèse de Doctorat, Université Laval, Canada, p. 370, 2011.

OUESLATI, O.; DUCHESNE, J. **The effect of SCMs on the corrosion of rebar embedded in mortars subjected to an acetic acid attack**. Cement and Concrete Research, v. 42, p. 467–475, 2012.

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

PILAR, R.; SCHANKOSKI, R. A.; MORO, A. J.; REPETTE, W. L. **Avaliação de pastas de cimento Portland contendo cinza pesada moída**. Revista Matéria, v.21, n.1, p. 92-104, 2016.

PELISSER, F.; STEINER, L. R.; BERNARDIN, A. M. **Recycling of Porcelain Tile Polishing Residue in Portland Cement: Hydration Efficiency**. Environmental Science & Technology, v. 46, 2368-2374, 2012.

PENTEADO, C. S. G.; CARVALHO, E. V.; LINTZ, R. C. C. **Reusing ceramic tile polishing wast in paving block manufacturing**. Journal of Cleaner Production, v. 112, Part 1, p. 514-520, 2016.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 6 ed. Atualizada e revisada por Vladimir Antônio Paulon. Porto Alegre: Globo, 1978.

PURIFICAÇÃO, E. B. **Estudo do uso de agregados reciclados de concreto e substituição do cimento por resíduo de polimento de porcelanato na produção de piso intertravado de concreto**. 2009. 104f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

RAMEZANIANPOUR, A.; JOVEIN, H. B. **Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes**. Construction and Building Materials, v. 30, p. 470–479, 2012.

RIBEIRO, A. B.; SANTOS, T.; GONÇALVES, A. **Performance of concrete exposed to natural carbonation: Use of the k-value concept**. Construction and Building Materials, v. 175, p. 360–370, 2018.

RILEM CONCRETE PERMANENT COMMITTEE. **Draft Recommendation: measurement of hardened concrete carbonation depth CPC-18**. Materials and Structures, v. 17, n. 102, p. 435-440, 1984.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem de concreto**. ET-67. 3 ed. São Paulo: IBRACON – Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

SANTOS, M. L. L. O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil**. 2008. 163p. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), UFRN, Natal.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. 2006. 267p. Tese (doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis.

SHAH, V.; BISHNOI, S. **Carbonation resistance of cements containing supplementary cementitious materials and its relation to various parameters of concrete**. Construction and Building Materials, v. 178, p. 219–232, 2018.

SAFIUDDIN, M.; WEST, J.; SOUDKI, K. **Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash**. Cement and Concrete Composites, v. 32, p. 708-717, 2010.

SOUSA JÚNIOR, A. M. S. **Efeito da adição de filler a base de resíduo do polimento do porcelanato e dispersão aquosa de poliuretana na permeabilidade de pastas de cimento**. 2016. 94p. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo (PPGCEP), UFRN, Natal.

SOUZA, P. A. B. F. **Estudo do comportamento plásticos, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato**. 2007. 230p. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), UFRN, Natal.

SILVA, G. J. B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato**. 2005. 107p. Dissertação (mestrado). Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte.

SILVA, M. G. **Avaliação da incorporação combinada dos resíduos de cascalho de perfuração de poço petrolífero e de polimento do porcelanato em cerâmica vermelha**. 2012. 147p. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, UFRN, Natal.

STEINER, L. R. **Efeito do Rejeito de polimento do porcelanato na fabricação de blocos de concreto de Cimento Portland**. 2011. 41p. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação). Engenharia Civil, UNESC, Criciúma.

STEINER, L. R. **Efeito do resíduo do polimento de porcelanato como material cimentício suplementar**. 2014. 126p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), UNESC, Criciúma.

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.

TAYLOR, H. F. W. **Cemente Chemistry**. 2 ed. London: Thomas Telford, 1990.

TURNER, L. K.; COLLINS, F. G. **Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 43, p. 125–130, 2013.

VASCONCELOS, M.C. A. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizando métodos físicos**. 2013, 133p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (POSCIVIL), UFPE, Recife.

WANG, G.; TIAN, B. **Effect of Waste Ceramic Polishing Powder on the Properties of Cement Mortars**. *International Conference on Energy and Environment Technology*, 2009.

WANG, G.; XU, K. J.; ZHU, M. Q.; TIAN, B. **Pozzolanic Activity of Ceramic Polishing Powder as Cementitious Material**. *Materials Science Forum*, v. 675, p. 135-138, 2011.

WANG, D.; SHI, C.; FARZADNIA, N.; SHI, Z.; JIA, H.; OU, Z. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 659-672, 2018.

WEN, S.; CHUNG, D. D. L. **Effect of stress on the electric polarization in cement**, *Cement Concrete Research*, v. 31, p. 291-295, 2001.

XIAO, J.; QU, W.; LI, W.; ZHU, P. **Investigation on effect of aggregate on three non-destructive testing properties of concrete subjected to sulfuric acid attack**. *Construction and Building Materials*, v. 115, p. 486–495, 2016.

YUNHONG, C.; FEI, H.; GUANG-LU, L.; LONGSHUO, X.; JIANLONG, H. **Test research on effects of ceramic polishing powder on carbonation and sulphate-corrosion resistance of concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 55, p. 440–446, 2014.

ZHU, X.; ZHANG, Z.; YANG, K.; MAGEE, B.; WANG, Y.; YU, L.; NANUKUTTAN, S.; LI, Q.; MU, S.; YANG, C.; BASHEER, M. **Characterisation of pore structure development of alkali-activated slag cement during early hydration using electrical responses**. *Cement and Concrete Composites*, v. 89, 139-149, 2018.

ZHONG, M.; SU, D.; ZHAO, Y. **Hydration Activity of Ceramic Polishing Powder at Autoclaved Condition**. *Advanced Materials Research*, v. 568, p. 392-395, 2012.