

# Concreto sustentável produzido com resíduo de porcelanato: Análise de durabilidade por carbonatação

Vanessa Batista Rodrigues Medeiros<sup>1</sup>, Evelyne Emanuelle Pereira Lima<sup>2</sup>, Carlos Mavial de Carvalho<sup>3</sup>, Antônio da Silva Sobrinho Júnior<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Engenheira Civil, [vanessabatistar@gmail.com](mailto:vanessabatistar@gmail.com),

<sup>2</sup>Tecnóloga em Construção de Edifícios e Mestre, Professora e Coordenadora Adjunta do Curso de Engenharia Civil do Unipê, [evelyne.lima@unipe.br](mailto:evelyne.lima@unipe.br),

<sup>3</sup>Engenheiro de Materiais e Mestre, Professor do Curso de Engenharia Civil do Unipê, [carlos.carvalho@unipe.br](mailto:carlos.carvalho@unipe.br),

<sup>4</sup>Engenheiro Civil e Doutor, Professor Adjunto do Departamento de Arquitetura da UFPB e Professor do Curso de Engenharia Civil do Unipê, [sobrinhojr@hotmail.com](mailto:sobrinhojr@hotmail.com).

**Resumo** – É inevitável a produção de resíduo em um processo industrial, tendo em vista que, se não houver uma prática de reaproveitamento, esses resíduos serão descartados em aterros sanitários e/ou diretamente ao meio ambiente, gerando custos e prejuízos a sociedade. Atualmente, a construção civil tem apresentado comportamento positivo no reaproveitamento de seus resíduos, como também na utilização de resíduos provenientes do processo industrial. Portanto, o presente trabalho tem por finalidade, mostrar a viabilidade técnica e econômica, da utilização de rejeitos industriais, no processo de fabricação do concreto. Para a produção do concreto sustentável, utilizou-se o resíduo do polimento do porcelanato (RPP), de onde, durante o procedimento de análises, verificou-se a ausência de pozolanicidade. Assim, decidiu-se-á substituição do agregado miúdo, fazendo substituições em diferentes percentagens, como 10, 20 e 40% de substituição. Foram moldados 80 corpos de provas, para analisar sua absorção, resistência à compressão e carbonatação em diferentes idades. Pôde-se notar que à medida que acrescia o percentual de substituição, aumentava sua taxa de absorção, ultrapassando o limite recomendado pela norma, resistência à compressão e profundidade de carbonatação com o decorrer do tempo.

**Palavras-chave:** Concreto sustentável, Resíduo industrial, Taxa de absorção, Carbonatação, Resistência à compressão.

**Abstract** – The production of waste in an industrial process is unavoidable, since, if there is no reuse practice, such waste will be disposed of in landfills and / or directly into the environment, generating costs and damages to society. Currently, civil construction has shown positive behavior in the reuse of its waste, as well as in the use of waste from the industrial process. Therefore, the present work has the purpose of showing the technical and economic viability of the use of industrial waste in the concrete manufacturing process. For the production of sustainable concrete, the porcelain polishing residue (RPP) was used, where,

during the analysis procedure, the absence of pozzolanicity was verified. Thus, it will be decided to replace the small aggregate, making substitutions in different percentages, such as 10, 20 and 40% substitution. 80 test bodies were molded to analyze their absorption, compressive strength and carbonation at different ages. It could be noted that as the percentage of substitution increased, its rate of absorption increased, exceeding the limit recommended by the standard, compressive strength and depth of carbonation with the passage of time.

**Keywords:** Sustainable concrete, Industrial waste, Absorption rate, Carbonation, Compressive strength.

## I. INTRODUÇÃO

A construção civil é uma grande consumidora de recursos naturais não renováveis e geradora de resíduos e poluição. Os resíduos originados no setor da construção civil e industrial têm causado preocupações, onde seu descarte insensato pode oferecer riscos à sociedade e ao meio ambiente.

Define-se resíduos sólidos como resíduo em estado sólido e semissólido, oriundo de atividades de procedência doméstica, industrial, comercial, e de serviços agrícolas e hospitalares [7].

Atualmente a sustentabilidade tem ganhado espaço na construção civil, através da produção de concreto e argamassas, utilizando resíduos que seriam descartados à natureza sem qualquer finalidade. Essa prática estabelecida visa diminuir os conflitos que ao longo tempo poderiam causar sérios impactos ambientais, como: a deposição descontrolada de resíduos no solo; diminuição dos danos causados pela exploração da matéria prima e redução no consumo de energia.

Em decorrência do aumento de crédito mobiliário a população, a construção civil tem aumentado seu consumo de materiais, visando atender a demanda solicitada. No entanto a geração de resíduos tem crescido de igualitariamente [10].

Segundo o anuário 2015 do Departamento Nacional da produção de mineral [14], a quantidade da produção

de mineral comercializada no ano de 2014, foi de 391.765.746 toneladas de areia para construção, 308.828.808 toneladas de brita e cascalho, e 71.000.000 toneladas de cimento, apresentando em média por habitante brasileiro um consumo de 350 kg de cimento. No entanto, o setor também tem se mostrado com grande potencial para reaproveitamento, não só de seus próprios resíduos, como de resíduos oriundos de outras atividades industriais.

Desses resíduos industriais, existe o resíduo do polimento de porcelanato (RPP), que é produzido no final do processo de fabricação da cerâmica, decorrente da etapa de polimento das peças. Ele tem um grande potencial para aproveitamento em concretos, [30].

Para a realização desta pesquisa serão utilizados resíduos oriundos da indústria de porcelanato, localizada na região da grande João Pessoa, que na maioria das vezes é descartado ao meio ambiente, podendo oferecer dificuldades sanitárias e econômicas. Assim, o RPP pode ser aproveitado como adição em argamassas e substituto parcial de agregados miúdos em concretos, trazendo diversas vantagens como: destino seguro para o resíduo, evitando acúmulo em locais públicos; agregar valor ao resíduo; reduzindo no concreto à quantidade de agregado miúdo (areia), diminuindo os impactos ambientais em decorrência de seu descarte.

Mesmo visando utilizar o resíduo para baratear o seu custo e diminuir o consumo de matéria prima não renovável, não é aceitável deixar esquecer-se da qualidade e durabilidade. Sabendo da importância que a resistência mecânica do concreto deve apresentar, pesquisadores continuam se dedicando aos conhecimentos quanto à durabilidade das estruturas e as características dos materiais usados, passando a possuírem a mesma importância [27].

Os aspectos de durabilidade são de grande importância, há algumas décadas, já se observava as alterações em decorrência de reações físicas e químicas provocadas pela ação da natureza.

Uma das patologias mais conhecidas que reduz a durabilidade das estruturas de concretos é a carbonatação, podendo acarretar sérios danos, tanto no aspecto econômico, na dificuldade de recuperação e na solução ao longo do tempo. Apesar do grande número de pesquisas realizadas na área de concreto com adições de resíduos voltados para carbonatação, há muito ainda para ser estudado [27].

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

O concreto é um material produzido a partir da mistura de outros materiais em quantidades racionais, de: aglomerantes (cimento), agregados (brita e a areia), água e aditivos. Logo após a mistura, o concreto deve possuir plasticidade suficiente para as operações de manuseio, transporte e lançamentos, adquirindo resistência com o passar do tempo.

Os materiais pozolânicos, são materiais que quando adicionados ao concreto possuem a propriedade de melhorar características inerentes à permeabilidade,

trabalhabilidade, geração de calor e resistências mecânicas em idades elevadas [16].

As pozolanas são, por definição, substâncias constituídas de sílica e alumina que, em presença de água combina-se com o dióxido de cálcio e com diferentes componentes do cimento formando compostos estáveis à água e com propriedades aglomerantes [22].

O resíduo do polimento do porcelanato (RPP), é um material oriundo do processo realizado por máquinas polidoras, com a finalidade de transformar a peça de porcelanato rústica (sem brilho), em uma peça polida (com brilho).

O processo de polimento consiste em um equipamento dotado de várias cabeças polidoras compostas de materiais abrasivos, que em contato com as peças com alta rotação, velocidade controlada e em presença de água, executam o polimento, sendo, que à medida que a peça passa pela máquina, os abrasivos usados apresentam gradativamente uma granulometria mais fina, até conseguir-se o resultado de polimento desejado [12]. O material abrasivo utilizado durante o polimento é geralmente composto por partículas de diamante ou carbeto de silício aglomerados por cimentos à base de cloretos magnesianos [11].

Para execução do presente trabalho, o resíduo de polimento foi recolhido em uma fábrica de porcelanatos, situada na região da pesquisa [17]. Onde atualmente, é descartado no pátio interno da fábrica.

O resíduo é constituído por um composto de sílica, alumina, óxido de magnésio e outros componentes químicos, em pequenas quantidades, sendo a sílica o principal elemento. Sua característica predominante é um pó esbranquiçado, de pequena granulometria, apresentando coesão quando submetido à umidade.

Concretos e argamassas com agregados de alto teor de reatividade pozolânica podem contribuir positivamente para a resistência a compressão em idades avançadas [23].

Para a realização deste estudo, foi realizado o ensaio de pozolanicidade do resíduo com a cal e do resíduo com cimento [1, 2].

O resíduo de polimento de porcelanato não apresenta propriedades cimentícias (Pozolanicidade), porém apresenta comportamentos satisfatórios para outras análises como a resistência a compressão, tração e flexão [13, 20, 23, 30].

Os ensaios de Pozolanicidade foram produzidos a partir dos seguintes materiais: CP II F-40, composto a base de filer, contendo 6% a 10% de filer de calcário, possui coloração uniforme, sendo regular quanto às propriedades físicas, químicas e resistivas, podendo apresentar facilidade de interpretação nos resultados e descartando possíveis variáveis no concreto produzido. Não sendo recomendado para meios agressivos [8]; Agregado miúdo, areia do tipo normal, graduada [4]; Agregado graúdo com granulometria de 1,2 mm, passando pela peneira de número 16; A cal hidratada, que é um produto derivado do calcário, muito utilizado

na construção civil, podendo ser classificado em três tipos: CHI, CH-II e CH-III, variando respectivamente na ordem de maior pureza química e granulometria [3]. Durante o estudo foi utilizado a CHI, apresentando maior pureza e qualidade; Água oferecida pela companhia de água da região e o resíduo de polimento de porcelanato (RPP). [24] constataram em seu trabalho que o RPP é constituído predominantemente por sílica, alumina e óxido de magnésio, sendo a sílica o constituinte principal e que as fases cristalinas presentes no resíduo são quartzo, mulita, periclase e carbeto de silício.

Para o ensaio de Pozolanidade do resíduo com o cimento Portland, foram moldados 2 grupos de 3 corpos de provas cada um respectivamente, denominados grupo referência e grupo com adição de RPP, [5,2]. No grupo referência utilizou-se cimento CP II F-40, areia normal e água, e no grupo com adição de RPP foi utilizado CP II F-40, RPP (2,33g/cm<sup>3</sup>), areia normal, água, sabendo que a quantidade de resíduo está relacionada a 25% da porcentagem do cimento.

Concluído o tempo de cura estabelecido [2], aos 28 dias os corpos de provas foram retirados da cura úmida e foram submetidos a ensaio de compressão simples. Pôde-se verificar que o índice de pozolanidade das amostras obteve valores muito baixos em relação aos esperados. Assim, foi decidido refazer o ensaio para que se fosse feita uma análise melhor do procedimento de construção das amostras, descartando quaisquer dúvidas ou erros de execução.

Sabe-se que a norma [2] vigente atualmente, recomenda valor superior de 90% de resistência comparada ao concreto referencial.

Para o ensaio de pozolanidade do resíduo com cal, foram moldados 3 corpos de provas, seguindo orientação [1]. Foi utilizada a quantidade de resíduo conforme orientação prescrita pela norma, cálculo esse em função da massa específica da cal hidratada fornecida pelo fabricante (2,7g/cm<sup>3</sup>) e a massa específica do resíduo (2,33g/cm<sup>3</sup>).

Concluído o período de cura [1], aos 7 dias os corpos de provas foram submetidos a ensaio de compressão, sob uso de uma máquina de compressão axial para ser verificada a sua resistência, onde foi verificada sua baixa resistência, obtendo valores inferiores a 6 MPa exigidos pela norma como referência.

Em decorrência dos valores adquiridos nos ensaios de pozolanidade, decidiu-se na produção do concreto a substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de porcelanato, utilizando em diferentes percentagens e analisando sua melhor quantidade de uso. Tendo em vista o alto volume de comercialização dos minerais não renováveis, como os agregados.

Pode ser considerado concreto sustentável o concreto feito a partir de resíduos industriais, visando economia dos recursos naturais e redução das emissões de gases provocados pela queima do clínquer [25]. Atualmente, existem diversos estudos mostrando a viabilidade do uso de concreto sustentável na construção

civil, por oferecer um custo final menor que o concreto convencional, podendo ser utilizado como concreto estrutural e não estrutural.

Na produção do concreto sustentável, foi utilizado o CPV- ARI (Cimento Portland de alta resistência inicial), em sacos de 40kg. A escolha desse tipo de cimento se deu em função pela dispensa de adições pozolânicas e conter baixas adições carbonáticas no seu processo de fabricação. Esse produto contém teores de calcário e argila diferenciados na produção do clínquer, sua textura é extremamente fina, e quando em contato com umidade, adquire elevada resistência inicial com pouca idade.

Assim, foram definidos os seguintes traços, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Dados dos traços da pesquisa.

<i>Traço em volume</i>	<i>Traço em massa</i>
Traço Referência (sem resíduo)	1 : 1,6 : 2,4 : 0,50 (cimento : areia : brita : água)
Traço com 10% de substituição do agregado miúdo por RPP	1 : 1,44 : 2,4 : 0,16 : 0,50 : 0,3% : 0,4% (cimento : areia : brita : rpp : adit. plast. : adit. super plastif. : água)
Traço com 20% de substituição do agregado miúdo por RPP	1 : 1,28 : 2,4 : 0,32 : 0,50 : 0,4% : 0,4 % (cimento : areia : brita : rpp : adit. plast. : adit. super plastif. : água)
Traço com 40% de substituição do agregado miúdo por RPP	1 : 0,96 : 2,4 : 0,64 : 0,50 : 1% : 0,6% (cimento : areia : brita : rpp : adit. plast. : adit. super plastif. : água)

Fonte: Autores da pesquisa

Para a fabricação do concreto de referência foi utilizada uma betoneira. Com ela desligada foi adicionado o agregado graúdo, agregado miúdo e o cimento, posteriormente foi ligada para que a homogeneização do material, logo após foi-se adicionando aos poucos a água até que encontrasse a consistência ideal.

Para a fabricação dos concretos com resíduos, foi utilizada a mesma betoneira do concreto de referência, sendo higienizada para que não existissem quaisquer resíduos do concreto anterior, descartando possíveis resultados incoerentes. Com ela desligada, foi adicionado o agregado graúdo, agregado miúdo, o cimento e o resíduo (RPP), posteriormente foi ligada para que a homogeneização do material, logo após foi adicionado aos poucos à água e os aditivos plastificantes e super plastificantes, sendo esses diluídos em um pouco da água a ser utilizada.

Para o concreto com 10 % de resíduo não necessitou acréscimos de materiais como aditivos, para que encontrasse a consistência ideal, assim seguiu-se rigorosamente o seu traço. Logo, os concretos com 20 e 40 % de resíduos, em decorrência da quantidade de finos em suas composições, apresentaram uma mistura menos coesa, mais seca, sendo necessária a adição de água e aditivos, foi feito um acréscimo de aproximadamente de 20% da quantidade original dos traços desses materiais.

Assim os concretos apresentaram uma uniformidade ideal.

Foi utilizado um aditivo superplastificante base policarboxilatos para concreto com alto poder de redução de água e isento de cloretos, desenvolvido para fornecer excelente manutenção de abatimento e resistência à segregação, indicado para a produção de concretos de elevado desempenho e resistência [18].

Aditivo é um produto adicionado durante o processo de preparação do concreto, em quantidade não maior que 5 % da massa de material cimentício contida no mesmo, com o objetivo de modificar suas propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido [9].

Os aditivos superplastificantes são também chamados de aditivos redutores de água de alta eficiência, porque são capazes de reduzir de três a quatro vezes, a água de amassamento em uma determinada mistura de concreto, comparado a aditivos redutores de águas normais [25]. Atualmente cerca de 70 a 80% dos concretos produzidos possuem em sua composição um ou mais aditivos [30].

Durante o processo de fabricação, foram examinadas suas propriedades:

Estado fresco: A trabalhabilidade que é a propriedade de manipulação do concreto em seu estado fresco, com perda mínima das características, apresentando mais qualidade e facilidade no seu manuseio, reduzindo os custos e podendo ser misturados, lançados, adensados e acabados com segurança; Consistência (propriedade essencial do concreto fresco, que revela a seu estado de umidade. A consistência quantifica a plasticidade, um dos fundamentais fatores que comprometem a trabalhabilidade); Segregação, conhecida pela separação dos agregados, deixando sua mistura heterogênea, não uniforme [26]. Logo, o agregado graúdo ficaria localizado no fundo da fôrma e nata (cimento + água) na superfície, levando a fissuras superficiais com tendência a desprendimento do pó); Exsudação (tendência da água de amassamento vir à superfície do concreto recém-lançado. Em consequência a parte superior do concreto torna-se excessivamente úmida, produzindo um concreto poroso e menos resistente).

Estado endurecido: Retração (fenômeno relacionado à diminuição do volume de concreto, desde o fim da cura até atingir um estado de equilíbrio compatível com as condições ambientais); A retração (redução do volume do concreto, causando fissuras); Permeabilidade, definida como a facilidade com que um fluido sobre pressão pode fluir através de um sólido [25]. É óbvio que reduzir a relação água/cimento, granulometria dos agregados, adensamento e a cura podem diminuir a permeabilidade); Resistência (definida como a capacidade para resistir à tensão sem romper); Durabilidade (tempo favorável a uma estrutura sem apresentar patologias sob ações ambientais).

Assim, para a realização dos ensaios de compressão, foram moldados 12 corpos de prova

cilíndricos com dimensões de 10x20 cm para cada traço estudado, totalizando 48 corpos de prova. As moldagens foram feitas com adensamento normal, (com duas camadas de concreto e 12 golpes em cada camada), após 24h os corpos foram desenformados e permaneceram por 7 dias em cura úmida a serem analisados por esse período e os demais por 28 dias em cura úmida.

Os ensaios de compressão foram efetuados aos 7, 28 e 90 dias de moldados, para cada traço foram utilizados três corpos de prova para o ensaio e um outro ficou como reserva, caso houvesse algum resultado incoerente.

O ensaio de compressão é feito em corpo de prova cilíndrico que deve ser posicionado de modo que, quando estiver centrado, seu eixo coincida com o da máquina de ensaio, de modo que a resultante das forças passe pelo centro. O atrito no contato das placas de aço da máquina de ensaios de corpos de prova pode causar impedimento a livre deformação transversal, devido a grande rigidez dessas placas, [32].

Para verificação da profundidade de carbonatação, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20 cm para cada traço estudado, totalizando 24 corpos de prova. As moldagens foram feitas com adensamento normal, (com duas camadas de concreto e 12 golpes em cada camada), após 24h os corpos foram desenformados e permaneceram por 28 dias em cura úmida. Posteriormente, foi passada uma camada fina de epóxi estrutural nas laterais dos corpos de prova, deixando apenas as faces superiores e inferiores exposta. Aguardou-se um período de três dias para a secagem total do produto e posteriormente os corpos de provas foram expostos em uma garagem de subsolo. Logo após os períodos estipulados de exposição, deram-se início aos ensaios de Carbonatação.

Diversos pesquisadores impermeabilizam parte dos corpos de prova para que o CO<sub>2</sub> penetre por apenas determinadas direções. Nessa pesquisa os corpos de prova, foram impermeabilizados longitudinalmente com massa estrutural do tipo epóxi, para que ocorresse a penetração pelas faces transversais [28]. Chegando ao dia do ensaio, os corpos de prova foram submetidos a uma serra circular para cortar concreto, fazendo corte longitudinal profundo, onde se dividiram ao meio, posteriormente com ajuda de um borrifador, foi aplicada a solução de fenofelina com álcool etílico a 99%, e com um paquímetro digital foi verificado a profundidade de carbonatação.

*“A determinação da profundidade de carbonatação se dá por meio de um indicador químico de pH, que é o método mais difundido para a determinação da frente de carbonatação, devido a sua praticidade e baixo custo. diversos pesquisadores relatam a metodologia a ser utilizada na determinação da profundidade de carbonatação com indicadores químicos, porém, não há consenso entre eles sobre a faixa de pH na qual há troca de indicação do indicado”* [28].

Foram observados os índices de absorção dos concretos estudados. Alguns autores definem ensaio de absorção como o crescimento da massa dos componentes do concreto em decorrência do preenchimento dos poros pela umidade, seu valor é expresso através da relação de sua massa saturada e seca.

Para essa verificação foram moldados 2 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20 cm para cada traço estudado, totalizando 8 corpos de prova. As moldagens foram feitas com adensamento normal, (com duas camadas de concreto e 12 golpes em cada camada), após 24h os corpos foram desenformados e após esse procedimento foram encaminhados à estufa laboratorial por 72h, com temperatura de  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ , logo após, foi registrada a massa seca da amostra [6]. Posteriormente dar-se-á início ao processo de imersão da amostra em água, a uma temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  durante 72h. Sabendo que essa imersão ocorre de forma fracionada, onde 1/3 de seu volume fica imerso nas primeiras 4h, 2/3 nas 4h subsequentes, sendo completamente imerso nas 64h restante. Posteriormente retirou-se o excesso de água com um pano úmido e foram pesados em uma balança de precisão para verificar sua massa saturada. O resultado obtido é a média das determinações realizadas.

### III. RESULTADOS DE PESQUISAS COM RPP

Realizaram um ensaio no Rio Grande do sul [13], com substituição de parte do cimento por RPP (20%), onde foram realizados ensaios em bancada de retração autógena com transdutores de deslocamento, sendo avaliadas duas composições em intervalos de 20 segundos durante aproximadamente 11 dias. Verificaram-se três fases da retração autógena. Como resultado, obtiveram uma redução média de 29,56% da retração autógena, expansão, em 33,45%, e a autosssecagem, em 33,91%, com 20% de substituição. Conclui-se que a substituição de cimento por RPP contribui de forma positiva na redução da retração autógena.

Em um outro ensaio foi utilizado o RPP na composição de argamassas com traço de 1:3:0,6 destinada à fabricação de blocos para alvenaria de vedação [31]. O autor estudou o efeito aglomerante como potencializador do efeito do cimento. Para caracterização física e química do material, foram realizados ensaios de granulometria a laser, fluorescência de raio x e absorção atômica.

Na mistura foram utilizadas quatro composições de argamassas de traço 1:3, adicionando 0, 5, 10 e 20 % do RPP em massa de cimento, sendo avaliada por meio de ensaios de índice de consistência, resistência à compressão e medida do calor de hidratação. Como resultado, o autor estudou o efeito aglomerante como potencializador do efeito do cimento e verificou melhoria nas características de trabalhabilidade e consistência das argamassas, uma diminuição na porosidade das argamassas, com consequente aumento da resistência (da ordem de 50 % com 20 % de adição

de RPP). Percebeu, também, melhoria no acabamento das peças, pois a presença de finos na massa conferiu uma textura mais suave das argamassas e uma superfície mais lisa.

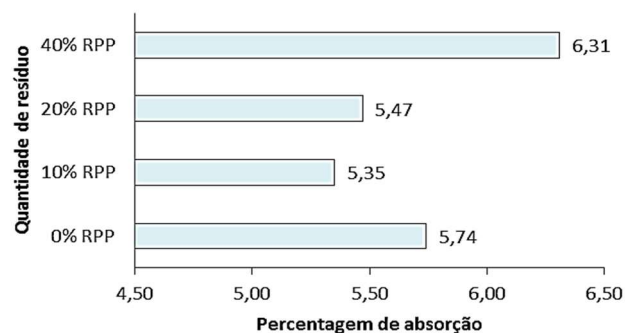
No entanto [31], ressalta que o resíduo possui alto teor de álcalis, limitando o uso em concretos que tenham agregados graúdos com presença de sílica amorfa, causando reação deletéria álcali-agregado.

Os autores [20] buscaram fazer o reaproveitamento do RPP, utilizando-as em argamassas de revestimentos. Para isso, avaliaram suas propriedades no estado fresco e endurecido, com acréscimo de resíduo em relação à massa de cimento. Conseguiram incorporar até 20% de resíduo, mantendo a consistência na faixa de  $260 \pm 5\text{mm}$ . Após os ensaios que avaliaram propriedades, como absorção, índice de vazios, resistência à compressão e resistência à tração na flexão, os autores puderam observar que os traços com a adição não provocaram nenhum resultado insatisfatório, quando comparados ao traço de referência. Ainda, submetem os traços a apreciação de mestre de obras experiente, o qual, concluiu que as argamassas com adição seriam bem aceitas no canteiro. O uso do RPP apresentou ainda, melhoria das propriedades das argamassas e permitiu atingir resistência à compressão superior a 18% na idade de 84 dias com redução de 20% do consumo de cimento, levando a um índice de eficiência de consumo de cimento de  $7,5\text{kg}/\text{MPa}/\text{m}^3$ . O resultado obtido neste trabalho foi atribuído ao fato do RPP produzido nas fábricas da região sul de Santa Catarina apresentarem propriedades pozolônicas.

### IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante de todas estas propriedades, o concreto sustentável apresentou comportamentos positivos e satisfatórios, conforme Figuras 1,2 e 3.

Figura 1 – Taxa de absorção aos 7 dias.



Fonte: Autores da pesquisa

Figura 2 – Resistência a compressão em MPa.

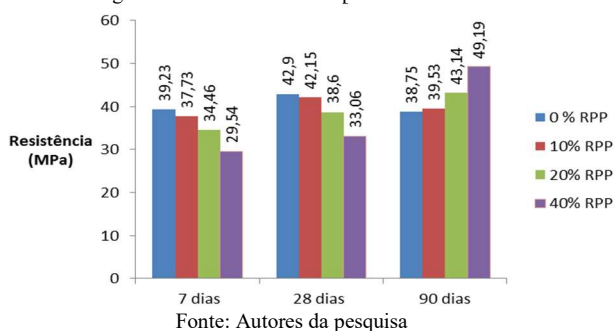
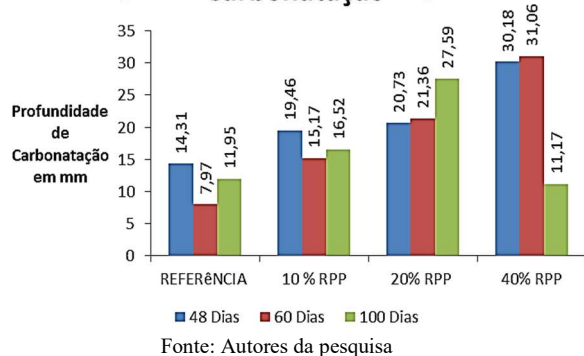


Figura 3 – Profundidade de carbonatação



Em relação aos resultados de ensaios de compressão axial, para comparar as médias, aplicou-se uma comparação por traço sem resíduo e traços com resíduo ao decorrer do tempo, o teste mostra que ao nível de 5 %, o teste de efeitos entre blocos, resultou que entre os traços houve diferença significativa, pois o p-valor resultou em 0,05, porém entre os traços com resíduos, não houve diferença, pois o p-valor resultou em 0,973 . O Teste de Tukey compara a média entre os traços com resíduos, com p-valor de 0,977 mostra que essa diferença não é significativa. Quanto aos traços, o teste de Tukey resultou no p-valor de 0,04, este resultado confirma que a resistência média dos traços aos 7 dias é menor que a resistência média dos traços aos 90 dias, ou seja, significa que a resistência à compressão aumenta ao longo do tempo. A Tabela 2 ilustra o teste de efeitos entre blocos.

Tabela 2 – Comparação entre as resistências médias dos tratamentos e os traços de concreto.

Origem	Soma dos Quadrados	gl	Quadrado Médio	F	Sig.
Sem resíduo	109,181	2	54,590	1,183	0,319
Com resíduo	1329,136	3	443,045	9,599	0,000*
Erro	1569,278	34	46,155		
Total corrigido	3007,595	39			

Nota: \* Diferença significativa, pois p-valor menor ou igual a 5%.

No contexto da carbonatação, com o teste de efeitos entre blocos, mostrou que esse fenômeno não apresentou diferenças significativas entre o traço sem resíduo com p-valor em 0,00. Quanto aos corpos de provas com resíduos, o teste mostrou que pelo menos

um difere na média da carbonatação com o passar do tempo. A Tabela 3 apresenta o resultado do teste.

Tabela 3 – Comparação entre as carbonatações médias dos tratamentos e os traços de concreto.

Origem	Soma dos quadrados	gl	Quadrado médio	F	Sig.
Sem resíduo	109,181	2	54,590	1,183	0,319
Com resíduo	1329,136	3	443,045	9,599	0,000*
Erro	1569,278	34	46,155		
Total corrigido	3007,595	39			

Nota: \* Diferença significativa, pois p-valor menor ou igual a 5%.

O teste de Tukey mostrou que, o corpo de prova de referência ou 10 % apresentaram as menores médias de carbonatação, e são significativas quando comparadas com as médias de carbonatação de 20 % e 40 %. Isto significa que o corpo de prova do tipo referência ou 10% tem a mesma média, ou seja, se for usado o corpo de prova de referência ou um corpo de prova com 10 % de resíduo, ambos apresentam menor efeito de carbonatação.

## V. CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados, pode-se concluir que: O RPP não apresenta pozolanicidade. Embora na produção do concreto sustentável, substituindo parte do agregado miúdo mostrou um bom desempenho com relação à resistência a compressão simples, em todos os traços de concreto estudado. Chamamos de *fck* (resistência do concreto a compressão), que é a resistência adotada para fins de cálculos, onde se admite a probabilidade da ocorrência de apenas 5 % de resistência a compressão. Apesar de alguns terem demonstrados valores não uniformes, a que caberia mais estudos e avaliações para possíveis correções, pode ser usado em várias áreas da construção civil de acordo com suas necessidades.

Os resultados mostram um comportamento não uniforme de alguns traços estudados, quanto à resistência à compressão com o passar dos dias. Os corpos de provas com 20 % e 40 % de resíduo apresentaram crescimento constante de resistência, isso pode ser explicado em decorrência da quantidade de finos existente no concreto. Devido o RPP apresentar partículas extremamente finas, altera-se a densidade da pasta de cimento, reduz o número de vazios, tornando-o mais coeso, oferecendo maior resistência. Porém, apresentou a maior taxa de absorção, ultrapassando o limite recomendado pela NBR 9778 de no máximo de 6 %. Neste trabalho não foi feita a análise estatística com os valores dos corpos de prova da taxa de absorção, porque o número de amostras eram escassas para uma análise mais coerente e segura.

A taxa de absorção é definida através da porcentagem de infiltração de água pelos poros capilares, que dependendo desses valores podem ser classificados de boa qualidade e durabilidade. Para pequenos valores de absorção, significa que os agentes agressivos apresentarão dificuldades de adentrar no concreto.

Com relação à carbonatação, percebeu-se que à medida que aumentava o tempo de exposição e a quantidade de substituição de agregado miúdo por resíduo, crescia a profundidade de carbonatação, isso pode ser explicado pela finura dos resíduos, que quanto mais finos, mais reativos, o que provoca o consumo do hidróxido de cálcio, reduzindo a reserva alcalina da solução dos poros, tornando o fenômeno de carbonatação mais acelerado.

Perante os resultados obtidos, foi feita uma análise comparativa dos dados, e verificou-se que à quantidade de até 20 % de substituição do agregado miúdo por RPP, é a mais confiável para o uso em concretos.

Devido o concreto sustentável ser um produto novo, e que merece mais tempo para avaliação de seu comportamento, não é indicado para fins estruturais, embora apresente resistência tão satisfatória quanto ao convencional. Assim, seu uso é indicado para calçadas, guias, contra pisos e blocos intertravados.

#### REFERÊNCIAS

- [1] ABNT NBR 5751. **Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal.** (NBR 5751). Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- [2] ABNT NBR 5752. **Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cimento.** (NBR 5752). Rio de Janeiro, ABNT, 2014.
- [3] ABNT NBR 7175. **Cal hidratada para argamassas.** NBR 7175, Rio de Janeiro, 2003.
- [4] ABNT NBR 7214. **Areia normal para ensaio de cimento.** (NBR 7214) Rio de Janeiro, 2015.
- [5] ABNT NBR 7215. **Cimento Portland. Determinação da resistência à compressão.** Versão corrigida: 1997. (NBR 7215) Rio de Janeiro, ABNT, 1996.
- [6] ABNT NBR 9778. **Argamassas e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** (NBR 9778) Rio de Janeiro, ABNT, 2005.
- [7] NBR 10004/2004. **Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- [8] ABNT NBR 11578. **Cimento Portland Composto.** Versão corrigida: 1997. (NBR 11578) Rio de Janeiro, ABNT, 1997.
- [9] ABNT NBR 11768. **Aditivos químicos para concretos de cimento Portland – Requisitos.** Versão corrigida: 2011. (NBR 11768) Rio de Janeiro, ABNT, 2011.
- [10] BARROS, R. M., **Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade, Rio de Janeiro.** Inter ciência, 2013.
- [11] BERNARDIN, A. M.; SILVA, M. J. CARVALHO; E. F. U. C.; RIELLA, H. G., **Cerâmicas celulares obtidas a partir de resíduos de polimento;** Cerâmica Industrial, v. 12, 2007.
- [12] BITTENCOURT, E.L.; BENINCÁ, E. **Aspectos superficiais do produto grês polido.** Cerâmica Industrial, v. 7, n. 4, p. 40-42, 2002.
- [13] CAUDURO, F. PELISSER, F. **Estudo da Retração autógena de pastas de cimento Portland com adição de resíduo do polimento do porcelanato.** Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), 2012.
- [14] DPNM. **Anuário do Departamento Nacional de Produção Mineral,** 2015. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>>. Acesso em: 09 jan. 2017
- [15] MOLIN, D. C. C. POSSAN, E.; VENQUIARUTO, S. D.; **Estudo da durabilidade de concretos com adição de cinza volante via metodologia de superfície de resposta.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, NORIE/UFRGS, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/recit/article/viewFile/83/2660>>. Acesso em: 20 mar. 2017.
- [16] EQUIPE DE FURNAS. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado a rolo;** Ensaio e propriedades. Laboratório de concreto, Departamento de apoio e controle técnico; Editor: Walton Pacelli de Andrade, São Paulo, Pini, 1997.
- [17] FÁBRICA CERÂMICA ELIZABETH. Disponível em: <<http://www.ceramicaelizabeth.com.br/>> Acesso em: 14 set. 2016.
- [18] GRACE CONSTRUCTION PRODUCTS. **Aditivo superplastificante para concreto.** Disponível em: <[https://gcpat.com/construction/pt-br/Documents/ADVA\\_2015.pdf](https://gcpat.com/construction/pt-br/Documents/ADVA_2015.pdf)>. Acesso em: 25 jan. 2017.
- [19] JACOBY, P.C.; PELISSER, F. **Utilização do resíduo de polimento do porcelanato na produção de materiais cimentícios.** Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), 2011.
- [20] KAZMIERCZAK, C.S. **Contribuição para análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra carbonatação.** 199.168f. Tese (Doutorado em engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- [21] LEITE, M. B; MOLIN, D. D; **Avaliação da atividade pozolânica de material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de construção e demolição.** Departamento de

- Tecnologia. Universidade Federal de Feira de Santana, UFFS, 2002.
- [22] LIMA, J.A.R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, 1999.
- [23] MARQUES, L. N.; MENEZES, R. R.; NEVESG. A.; SANTANA L. N. L.; LIRA, H.L.; FERREIRA H. C. **Re-aproveitamento do resíduo do polimento do porcelanato para utilização em massa cerâmica.** Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba, Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 2.2, p. 34-42, 2007.
- [24] MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais,** 4<sup>a</sup> Ed., IBRACON 2014.
- [25] NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** Tradução: Salvador E. Giammusso. 2<sup>a</sup> ed. Rev. atual. São Paulo: Pini, 1997.
- [26] PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. UFRGS. Porto Alegre, 2004.
- [27] PAULETTI, C. **Estimativa da Carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição.** Tese de doutorado em cotutela (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2009.
- [28] SOUZA, P.A.B.F. **Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato.** Tese. Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. 2007.
- [29] STEINER, L. R. **Efeito do rejeito de porcelanato na fabricação de blocos de concreto de cimento Portland.** Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), 2011.
- [30] TEIXEIRA, P.W.G.N. **Materiais: concreto e aço.** Aula 3. PEF- USP 2604, 2013.