



Concreto auto-adensável com resíduo do polimento de porcelanato

Alexandre Flomentin Serafim (1), Elaine Guglielmi Pavei Antunes (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) alexandrefserafim@hotmail.com, (2) elainegpa@unesc.net

Resumo: A alta demanda na construção civil eleva o consumo de recursos naturais e produz quantidades elevadas de resíduos em diversos setores – motivos que enfatizam a exploração de novas pesquisas e de diferentes planos para diminuir os impactos ao meio ambiente. É uma estratégia viável a reutilização de materiais descartados pelas indústrias com grande potencialidade na composição do cimento, tendo como exemplo disso o resíduo gerado no processo de polimento de placas de porcelanato. Este trabalho analisa a capacidade do uso do resíduo de porcelanato (RPP) como material cimentício suplementar (SCM), sendo substituído parcialmente do cimento Portland em 15%, 20% e 25%, para uma mistura de concreto auto-adensável (CAA). O RPP foi caracterizado por meio de ensaios de difração de raios-X, fluorescência de raios-X e granulometria a laser. A atividade pozolânica foi medida através do método de Chapelle e pelos índices de atividade pozolânica (IAP) com cal e cimento Portland. Já o concreto auto-adensável foi avaliado com a mistura ainda no estado fresco, através das características de fluidez e de adensamento por meio dos ensaios de *slump flow*, caixa L e anel J. No estado endurecido foi possível analisar a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a absorção de água e o índice de vazios. Com os resultados obtidos, não se observaram diferenças significativas entre as amostras em questão de fluidez e adensamento. Entre as amostras contendo o RPP, as com 20% de resíduo demonstraram melhor desempenho em relação ao módulo de elasticidade e de índice de vazios, e na resistência à compressão. Após 49 dias de cura, alcançaram uma média ligeiramente maior que as amostras sem o RPP. Em relação à atividade pozolânica, alguns resultados não foram atendidos segundo as prescrições da NBR 12653:2015.

Palavras-chave: atividade pozolânica; fíler; material cimentício suplementar; sustentabilidade.

Self-Compacting concrete with porcelain tile polishing residue

Abstract: The high demand in construction industry increases the consumption of natural resources and produces high amounts of waste in various sectors – reasons that emphasize the exploration of new researches and the different plans to reduce impacts on the environment. It is a viable strategy the reuse discarded materials by industries with great potential in the composition of cement, taking as an example the residue generated in the porcelain tile polishing process. This work analyses the capacity of using porcelain tile polishing (RPP) as a supplementary cementitious material (SCM), being partially substituted by Portland cement in 15%, 20% and 25%, for a self-compacting concrete mixture (CAA). RPP was characterized by

X-ray diffraction, X-ray fluorescence and laser grain size. The pozzolanic activity was measured by the Chapelle method and by the pozzolanic activity indexes (IAP) with lime and Portland cement. The self-compacting concrete was evaluated with the mixture still in its fresh state, through the characteristics of fluidity and thickening by the slump flow, box L and ring J tests. In the hardened state it was possible to analyze the compressive strength, the modulus of elasticity, the water absorption and the voids ratio. With the obtained results, no significant differences were observed between the samples in question of fluidity and density. Among the samples containing RPP, those with 20% of residue showed the best performance compared to the modulus of elasticity and the voids ratio, and in compressive strength. After 49 days of curing, they achieved a slightly higher average than samples without RPP. Regarding the pozzolanic activity, some results were not fulfilled according to NBR 12653:2015.

Keywords: pozzolanic activity; filler; supplementary cementitious material; sustainability.

Introdução

A carência por novas moradias e a necessidade de obras de infraestrutura relacionadas principalmente a países em desenvolvimento demanda conseqüentemente o aumento no consumo de matéria prima na construção. Em relação a essa questão, a sustentabilidade é atualmente um dos temas de grande abordagem relacionados aos avanços de novas pesquisas e tecnologias na construção civil, visto que o setor é consideravelmente um forte consumidor de recursos naturais (ABRÃO, 2017).

Estima-se que em 2050, a indústria cimenteira deve alcançar uma produção global de até 4,4 bilhões de toneladas de cimento. No momento, 10% das emissões de CO₂ são causadas na fabricação do clínquer, principal componente do cimento, podendo chegar a proporções de 30% até 2050 (VENUGOPAL et al. 2018), (ABRÃO, 2019).

No Brasil, segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), em 2016 foram produzidos 57 milhões de toneladas de cimento, sendo que, para cada tonelada, gerou-se mais de 550 Kg de CO₂.

A International Energy Agency (IEA) atualizou, no ano de 2018, um documento emitido em 2009 que enfatiza a redução da emissão de gás carbônico na produção do cimento e limita o aumento da temperatura global entre 2 °C a 3 °C até 2050. A agência aponta para quatro principais estratégias na diminuição da emissão de CO₂. Dentre elas está a utilização de materiais cimentícios suplementares (SCM's), recursos que na grande maioria são subprodutos descartados por outras indústrias.

Com o propósito de diminuir esse impacto ao meio ambiente, nos últimos anos a utilização de SCM's tem ganhado grande atenção. Seu uso para a composição do cimento Portland, como meta caulim, argilas calcinadas, cinzas da casca de arroz e do bagaço de cana, são alternativas que trazem resultados positivos para as pesquisas, pois além de minimizar os danos causados ao meio ambiente, também contribuem com resistência, durabilidade e redução de custos na construção (JUENGER, 2015; SALVO et al. 2015).

Os SCM's de origem pozolânica, segundo a NBR 12653:2015, são materiais que espontaneamente não possuem características aglomerantes, sendo compostos por grande parte de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) em estado amorfo, que reagem quando em contato com hidróxido de cálcio e na presença de água, dando propriedade ligante ao material. Além disso, as pozolanas são caracterizadas por conter alto teor de finos, e mais de 80% dos grãos são menores que 45 μm , fator que ainda agrega o efeito fíler na mistura, o que torna o concreto mais resistente e durável.

O Resíduo do Polimento de Porcelanato (RPP) tem sido explorado por pesquisadores como Silva (2005), Sales (2012), Breitenbach (2013), Steiner (2014), Lima (2015), Nascimento (2016) e Diniz (2018), que trazem resultados positivos quanto ao seu uso em concretos e argamassas. O RPP é um resíduo da indústria cerâmica, gerado na etapa final do processo de fabricação, onde as placas recebem polimento para eliminar imperfeições e ganhar brilho. De acordo com Matos et al. (2015), o processo de polimento das peças de porcelanato extrai cerca de 1mm de material e aproximadamente 100g/m² de RPP são gerados. Após isso, esse resíduo é então descartado, geralmente em aterros e sem nem um tipo de tratamento ou reuso, podendo ocasionar contaminação do solo e do lençol freático.

Em 2018, o Brasil produziu 795 milhões de metros quadrados de placas cerâmicas, conforme dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres (ANFACER). Essa alta produção ocorreu em razão de um aumento no consumo, ocasionando, por sua vez, um aumento no volume de resíduo gerado. Estima-se que nas cerâmicas do sul do Estado de Santa Catarina são produzidas cerca de 1.000 toneladas de RPP por semana (DINIZ, 2018).

Segundo Breitenbach (2013), a melhor forma de destino para resíduos de indústrias é a reutilização ou a sua reciclagem, processo em que é possível minimizar os danos causados ao meio ambiente, principalmente relacionados a materiais com capacidade de substituir recursos

naturais. Ghobbi (2016) também comenta que é possível obter ganho tecnológico, social e econômico quando se reutilizam resíduos, como no caso de pozalanas empregues em concretos.

Atualmente, as pesquisas relacionadas ao emprego de materiais sustentáveis destacam-se na composição do concreto convencional, devido a sua vasta utilização. No entanto, o crescimento do uso do concreto auto-adensável, em razão da dificuldade de o concreto convencional adensar e preencher pequenos pontos, ou mesmo para executar peças em que se exigem altas taxas de armadura, a segurança e vida útil de uma estrutura pode ser comprometida (TENNICH, 2018).

Segundo Calado (2015), um ponto de grande importância a considerar, dentre as características do concreto, é a sua forma ainda no estado fresco, levando em consideração que um concreto ideal precisa trabalhar de maneira que não exija grandes esforços físicos e nem habilidades elevadas de quem o manuseie, e também que necessite do menor número possível de operários para executar a sua aplicação.

Dentre os diferentes tipos de concretos que são oferecidos pelo mercado atual, o concreto auto-adensável (CAA) surge como destaque, por possuir propriedades com inúmeros benefícios para o estado final de uma estrutura. Tutikian (2004) aponta como sendo uma das principais características do CAA a capacidade de adensamento pelo seu próprio peso, sem a necessidade de vibração, que proporciona melhor desempenho na execução, diminui falhas, melhora o aspecto externo, reduz o tempo de lançamento e minimiza a mão de obra.

Os materiais finos são os grandes responsáveis por propiciar parte dessas características ao CAA pois, além de coesão, ocasionam o efeito fíler, onde os grãos de menor tamanho ocupam os pequenos vazios, eliminando regiões porosas, formando um concreto de maior resistência e de menor permeabilidade. Dentre essa necessidade de possuir maiores quantidades de finos que o concreto convencional, o CAA viabiliza o emprego de resíduos secundários de outras indústrias, proporcionando ganho físico e trabalhando de maneira a contribuir com a sustentabilidade na construção (TOKUDOME et al. 2006)

Nesse contexto, a pesquisa tem por objetivo analisar o uso do RPP como material cimentício suplementar em concreto auto-adensável. Para tal, será feita a análise de atividade pozolânica do RPP, com base na NBR 12653: 2015, e também será feita uma análise das

características físicas e das propriedades mecânicas de concretos auto-adensáveis produzidos com substituição parcial do cimento Portland por RPP.

Materiais e métodos

A referente pesquisa foi elaborada em etapas, iniciando-se pelo referencial bibliográfico, onde foram concebidas as informações sobre os métodos a serem realizados e os materiais a serem utilizados. Posteriormente, realizaram-se os seguintes procedimentos: coleta do resíduo na indústria, desagregação e caracterização, ensaios para determinação da atividade pozolânica, ensaios no estado fresco, ensaios no estado endurecido. Por fim, analisaram-se os resultados. O fluxograma apresentado na Figura 1 refere-se ao procedimento experimental.

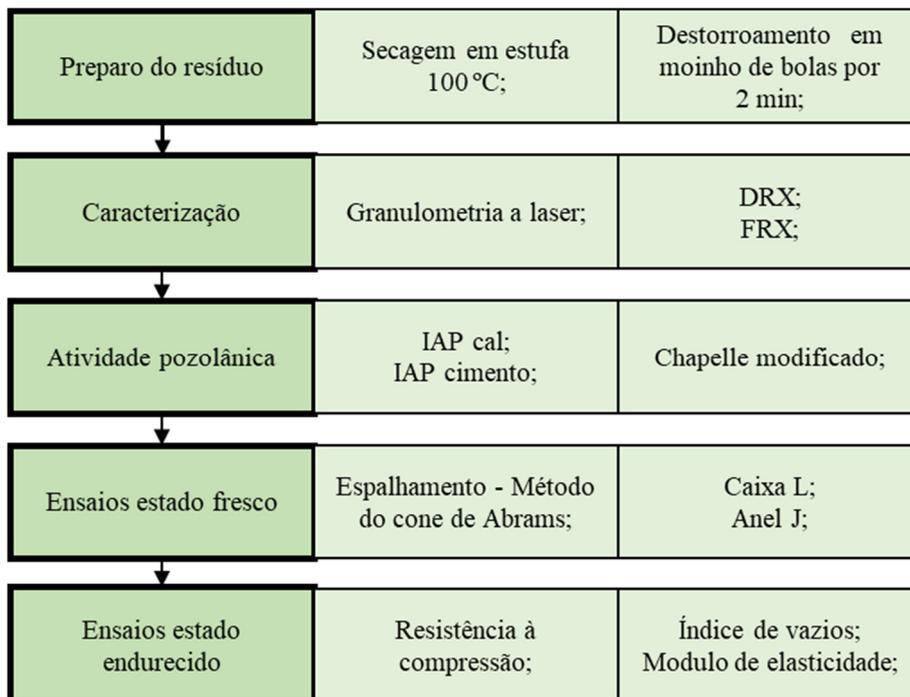


Figura 1. Fluxograma das principais atividades.

O RPP foi fornecido por uma empresa de cerâmica situada no Sul do estado de Santa Catarina. O processo de polimento do porcelanato é feito com a injeção de água para evitar a geração de poeira e eliminar o resíduo da cerâmica. Por isso, o material foi coletado ainda úmido. Para continuar os procedimentos, o resíduo foi seco em estufa à temperatura de 100 °C por 24h.

O resíduo passou por um processo em que foi destorroado em moinhos de bolas do tipo CT-242, com capacidade para 300ml, e em rotação de 380 rpm por 2 minutos, apenas para eliminar aglomerados, além de armazenado em local seco.

Na caracterização do RPP, realizou-se a espectrometria de fluorescência de raio-X (FRX) pela marca Panalytical, modelo Axios Max. Este ensaio analisou as composições químicas do material, e permitiu classificar sua atividade pozolânica a partir da quantidade de seus elementos químicos. O ensaio de difração de raio-X (DRX) foi realizado por meio de um difratômetro Shimadzu, modelo XRD 6000, com uma radiação Cu K α ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$), à potência de 40 kV e 30 mA, com intervalo de leitura (2θ) entre 10° e 80° e passo de 2° por minuto, identificando as fases cristalinas do material.

Para determinar a pozolanicidade do RPP, conforme preconiza a NBR 12653:2015, foram executados os ensaios de índice de desempenho aos 7 dias com a cal (obedecendo os procedimentos indicados pela NBR 5751:2015), e o índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias (padronizado pela NBR 5752:2014). Esses dois métodos determinam a capacidade reagente do material com hidróxido de cálcio em contato com a água, a qual possui propriedades cimentícias que se dão através da resistência à compressão. O método direto de Chapelle modificado foi realizado a fim de determinar o teor de hidróxido de cálcio fixado em materiais silicosos e sílico-aluminosos, o qual identifica diretamente a capacidade pozolânica de um material e é normatizado pela NBR 15895:2010.

O concreto referencial para a confecção dos ensaios no estado fresco e endurecido seguiu o traço referência de 1: 2,5: 2,6: 0,5 (cimento, areia média/fina, brita 0 e água), baseado em Tutikian (2004), Tokudome (2006) e foi ajustado conforme traço usualmente utilizado por uma empresa de pré-moldados da região. Para fins de consistência e trabalhabilidade, foi fixada a quantia de 1% em massa de aditivo super plastificante em relação ao aglomerante. A substituição do cimento pelo resíduo foi fixada em 3 diferentes porcentagens, quais sejam: 15%, 20% e 25%, visto que Lima (2015) estudou o comportamento do RPP e utilizou quantidades semelhantes em sua pesquisa e obteve resultados positivos relacionados à corrosão das armaduras e durabilidade. Silva (2005) também observou resultados satisfatórios para a resistência à compressão e trabalhabilidade da mistura, quando utilizou até 20% de RPP em traços para concreto convencional.

Os materiais utilizados nas amostras estão apresentados na Tabela 1, que indica a relação dos traços unitários para a composição dos corpos de prova com as respectivas substituições do cimento pelo RPP. Utilizou-se os agregados disponibilizados pelo parque científico e tecnológico (i-parque), onde os ensaios foram realizados. O cimento utilizado foi o CP II F 32.

Tabela 1. Traços unitários

| % de substituição | Amostra | Cimento | Areia | Brita 0 | RPP | Aditivo superplast. | Relação água/aglomerante |
|-------------------|---------|---------|-------|---------|------|---------------------|--------------------------|
| 0 | REF | 1,00 | 2,54 | 2,58 | - | 0,01 | 0,50 |
| 15 | RPP15 | 0,85 | 2,54 | 2,58 | 0,15 | 0,01 | 0,50 |
| 20 | RPP20 | 0,80 | 2,54 | 2,58 | 0,20 | 0,01 | 0,50 |
| 25 | RPP25 | 0,75 | 2,54 | 2,58 | 0,25 | 0,01 | 0,50 |

Para verificar as características do CAA no estado fresco, foram realizados os ensaios normatizados pela NBR 15823:2017. A determinação do espalhamento e tempo de escoamento foi realizada por meio do método do cone de Abrams, que tem como finalidade analisar a consistência do concreto, além de terem sido realizados também os testes da caixa L e anel J, que medem a habilidade passante pelas armaduras.

No estado endurecido, o ensaio de resistência à compressão foi executado com a confecção de 24 corpos de prova, 6 para cada substituição de cimento por resíduo, e esses corpos foram rompidos aos 28 e 49 dias, através da prensa de compressão EMIC, modelo PC2000CS, seguindo os critérios da NBR 5739:2018. Além disso, foram determinados a absorção de água por imersão, o índice de vazios e a massa específica, conforme os procedimentos repassados pela NBR 9778:2005. Na verificação do módulo de elasticidade, 3 corpos de prova para cada porcentagem foram analisados, e obedecidos os critérios da NBR 8522:2017, também com o uso do equipamento EMIC PC2000CS, o qual utilizou como parte do carregamento 30% da média das forças obtidas nos ensaios de compressão aos 28 dias, tal como prescreve a norma.

Ao final, o CAA composto por RPP foi comparado e analisado com o CAA de referência através da análise de variância (ANOVA) e do Teste Tukey, quando considerado necessário, com 95% de significância.

Resultados e discussões

A Figura 2 traz os aspectos visuais do RPP, e em (a) é possível analisar a aparência do resíduo já seco naturalmente ao ar livre, e, em (b), o resíduo já destorroado após secagem em estufa por 24h a 100 °C.



Figura 2. Resíduo do polimento de porcelanato: (a) aspecto natural, (b) seco e destorroado

Através da granulometria a laser, pode-se observar que em relação aos diâmetros dos grãos, 10% são menores que 1,98 μm , 50% são menores que 9,61 μm e 90% do resíduo possui diâmetro menor que 34,47 μm , sendo que a média encontrada foi de 14,02 μm . Pode-se verificar que o resíduo apresenta tamanho médio de partícula coerente quando comparado com as análises feitas por outros pesquisadores. Breitenback (2013) indica um diâmetro médio do RPP com 5,9 μm ; Steiner (2014) comenta sobre suas amostras terem diâmetro médio de 9,1 μm ; e Lima (2015) aponta que seu resíduo possui diâmetro médio de 20,14 μm .

Em conformidade com a NBR 12653:2015, o RPP apresentou 96,27% em volume passante na peneira de 45 μm , valor que atende ao mínimo de 80% estabelecido e que se classifica como um dos requisitos físicos de propriedade pozolânica.

A análise química feita por fluorescência de raios-X apresentada na Tabela 2 identifica os elementos químicos compostos no resíduo, e permite classificá-lo dentre os parâmetros de classe pozolânica como preconiza a NBR 12653:2015.



Tabela 2. Análise química do RPP, por FRX.

| Elemento | Teor % | Elemento | Teor % |
|--------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| SiO ₂ | 66,90 | K ₂ O | 1,92 |
| TiO ₂ | 0,18 | P ₂ O ₅ | 0,24 |
| Al ₂ O ₃ | 18,25 | ZrO ₂ | 0,26 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,89 | BaO | 0,07 |
| MgO | 1,37 | ZnO | 0,68 |
| CaO | 2,34 | P.F | 3,98 |
| Na ₂ O | 2,06 | | |
| $\Sigma = 99,14$ | | | |

Seguindo os critérios da NBR 12653:2015, que determina valor mínimo de 70% na soma dos elementos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ para classificar quimicamente o material como pozolânico, pode-se concluir que o RPP atende esse requisito, somando 86,04%, o que se mostra em conformidade com outras análises químicas do resíduo feitas por Souza (2007) e Breitenbach (2013), as quais apresentam resultados de 84,28 % e de 84,71%, respectivamente.

O resultado do difratômetro de raios-X está expresso pelo gráfico na Figura 3. É possível analisar o pico de cristalização de sílica (SiO₂) presente em forma de quartzo na região de 26,5° (em 2 theta). A fase cristalina da sílica encontrada no RPP é um indicativo de baixa reatividade do material.

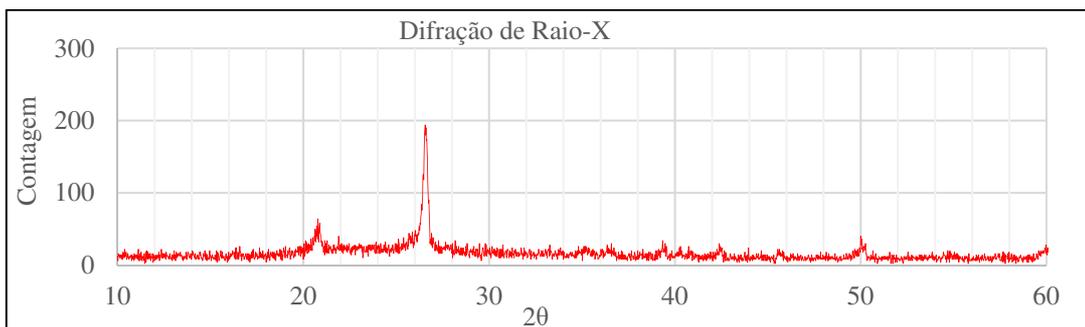


Figura 3. Difração de raios X.

Os resultados dos experimentos realizados para determinar a atividade pozolânica do RPP estão expressos nas Tabelas 3 e 4. A Tabela 3 mostra os resultados dos ensaios de compressão obtidos pelos métodos diretos com a cal aos 7 dias, e com o cimento Portland aos

28 dias, padronizados respectivamente pelas NBR 5751:2015 e NBR 5752:2014. A Tabela 4 exibe o resultado obtido pelo método direto de Chapelle modificado.

Tabela 3 - Índice de atividade pozolânica - Cal e Cimento Portland.

| Resistência à compressão (Mpa) | | |
|--------------------------------|------------|-------|
| Ensaios | Referência | RPP |
| Cal | 6,00 | 4,95 |
| Cimento Portland | 23,08 | 19,76 |

Tabela4 - Índice de atividade pozolânica método Chapelle modificado.

| Teor de hidróxido de cálcio fixado (mg/g) | |
|---|----------------|
| Amostra | $I_{Ca(OH)_2}$ |
| RPP | 482,84 |

Observa-se que o resultado de resistência à compressão dos corpos de prova rompidos aos 7 dias, conforme o método do índice de atividade pozolânica com a cal, teve média de 4,95 MPa, ficando abaixo do valor mínimo requerido pela NBR 12643:2014 de 6 MPa.

O ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova aos 28 dias com o cimento Portland demonstra que as amostras de referência, sem adição do resíduo, alcançaram a resistência média de 23,08 MPa, enquanto as amostras com a substituição do cimento pelo RPP atingiram a resistência média de 19,76 MPa. Dessa forma, ambas alcançaram 85,62% da resistência da amostra de referência, índice inferior ao mínimo determinado pela NBR 5752:2014, o qual é de 90%.

Os dois ensaios realizados para determinar a atividade pozolânica do material se mostram coerentes com Lima (2015) e Nascimento (2016), que constataram resultados não satisfatórios em relação à atividade pozolânica do RPP em suas pesquisas. Tais fatores devem ser assimilados ao resultado obtido pelo ensaio de DRX, sendo que a pozolanicidade está diretamente ligada ao halo amorfo, que não foi verificado presente no resíduo.

O método de Chapelle modificado, que determina a atividade pozolânica pela quantidade de hidróxido de cálcio fixada por grama de resíduo, apresentou-se favorável quanto à pozolanicidade do material, segundo Raverdy et al. (1980) o consumo mínimo de cal deve ser maior que 436 mg de $Ca(OH)_2$ g⁻¹. Conforme apresentado na Tabela 3, o consumo de cal pelo RPP foi de 482,84 mg $Ca(OH)_2$ g⁻¹.

A diferença entre os resultados obtidos da atividade pozolânica pode estar relacionada às limitações dos métodos de IAP com cal e com cimento Portland. Em sua pesquisa, Gobbi (2014) salienta sobre parâmetros que os métodos diretos não levam em consideração, como características físico-químicas da pozolanas, área específica, relação água/sólidos e taxa de reação do material em função do tempo. Ainda, o método direto de Chapelle modificado apresenta maior sensibilidade nos resultados segundo o autor, podendo detectar a atividade pozolânica mesmo que em pequenas proporções.

Na Tabela 5, estão apresentados os resultados relativos aos ensaios do concreto no estado fresco, que caracteriza as propriedades da amostra de referência e das amostras com os respectivos percentuais de substituição do cimento pelo RPP.

Tabela 5 - Ensaios no estado fresco

| Método | Referência | RPP 15% | RPP 20% | RPP 25% | Parâmetros da norma |
|-------------------|------------|---------|---------|---------|------------------------------------|
| Espalhamento (mm) | 774 | 772 | 769,5 | 775 | 750 a 850 |
| t500 (s) | 3,66 | 3,75 | 4,01 | 2,23 | >2 |
| Anel J (mm) | 724,5 | 707 | 709 | 727,5 | (Espalhamento - anel J) 25 a 50 |
| Caixa L(mm) | 0,84 | 0,9 | 0,82 | 0,95 | >0,8 |

A Figura 4 apresenta alguns dos métodos realizados para determinar a consistência e habilidade passante do concreto auto-adensável, sendo (a) o ensaio de anel J e (b) a caixa L.

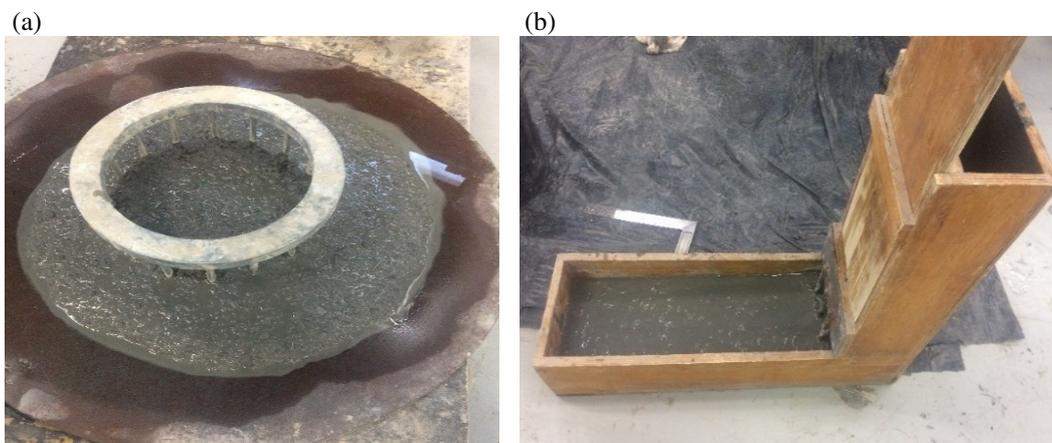


Figura 4. Ensaios de consistência e habilidade passante: (a) método Anel J, (b) método Caixa L

Os ensaios no estado fresco do CAA são classificados de acordo com a NBR 15823:2017. Para o método do espalhamento, a norma delimita o intervalo de valores entre 550 a 850 mm, entre a média de duas medidas perpendiculares dos diâmetros, e determina uma classe para cada aplicação dependendo do resultado do ensaio. Neste caso, todas as amostras atenderam aos requisitos da norma, e ficaram dentro da mesma classe, que varia de 760 a 850 mm, sendo que a mistura com 25% de RPP obteve espalhamento pouco maior comparado com as outras amostras.

O tempo para a o concreto escoar até alcançar o raio de 500mm no ensaio de espalhamento é outro parâmetro levado em consideração quanto à classe de aplicação do CAA, e é identificado como t_{500} . Conforme já demonstrado na Tabela 4, todas as amostras alcançaram tempos maiores que 2 segundos, e apesar de indicar maior viscosidade do concreto, é o recomendado por norma para a maioria das aplicações correntes.

As habilidades passantes das misturas foram avaliadas pelos métodos anel J e caixa L. No teste de anel J, apenas as amostras de referência e a com 25% de RPP apresentaram valores condizentes segundo a NBR 15823:2017. O teste mede a capacidade do espalhamento diante do obstáculo que simula as armaduras, e a diferença entre os diâmetros dos testes de espalhamento sem o anel J e com o anel J não deve ultrapassar 50 mm, sendo que os concretos com 15% e 20% de RPP obtiveram diferença maior que essa, alcançando 65 mm e 60,5 mm, respectivamente.

Em sua pesquisa com 40% de RPP em substituição do cimento, Lima (2015) afirma que o resíduo apontou um resultado satisfatório em relação às propriedades de fluidez e de coesão, visto que, para o teste de espalhamento, alcançou diâmetro de 780 mm, e teve um tempo de 1,06s para o teste de t_{500} .

Segundo Steiner (2014), ao avaliar argamassas contendo RPP, observou-se que com teores de substituição acima de 20% do cimento pelo resíduo, a consistência não se diferiu consideravelmente, devido à diluição do aglomerante e ao efeito lubrificante que facilita o escorregamento das partículas, atrelado ao fato de essas partículas possuírem tamanhos semelhantes aos do cimento.

Tal fator pode justificar os resultados dessa pesquisa, visto que o RPP analisado apresenta diâmetro médio de 14,02 μm , semelhante ao diâmetro do cimento encontrado na granulometria realizada por Lima (2015) de 14,94 μm .

No ensaio da caixa L, onde a habilidade passante é medida pela razão entre as alturas da superfície do concreto nas extremidades, todas as amostras apresentaram resultados semelhantes e atendem ao valor mínimo descrito por norma, que é de 0,8.

Para fins de aplicação, o concreto de referência com 25% de RPP atende a todos os parâmetros da NBR 15823:2017 e pode ser classificado como adequado para elementos estruturais com espaçamento de armadura de 80 mm a 100 mm.

Na Tabela 6 é possível observar o comportamento das amostras em relação à absorção de água e dos índices de vazios, fatores que influenciam diretamente na resistência e na durabilidade do concreto.

Tabela 6. Absorção de água – Índice de vazios e massa específica.

| RPP | Absorção de água | Índice de vazios | Massa específica seco | Massa específica saturada |
|-----|------------------|------------------|-----------------------|---------------------------|
| 0% | 3,62 | 8,69 | 2,40 | 2,49 |
| 15% | 3,72 | 8,91 | 2,39 | 2,48 |
| 20% | 3,37 | 8,10 | 2,40 | 2,48 |
| 25% | 4,31 | 10,26 | 2,38 | 2,48 |

Os resultados demonstraram que a substituição do cimento por RPP não alterou significativamente a absorção de água e o índice de vazios nas frações de 15 e 20% em comparação com as amostras sem o resíduo. Com a substituição de 25%, é possível visualizar um pequeno aumento tanto no índice de vazios quanto na absorção de água. Mesmo que os resultados não apresentem divergências consideráveis entre si com base na ANOVA, esse aumento de vazios com a utilização de maior quantidade de RPP, de acordo com Sales (2012), pode estar ligado à quantidade viável para a substituição do material, visto que o efeito fíler ocasionado pela finura do resíduo que diminui vazios também é contraposto pela quantidade de água que os finos absorvem.

A resistência à compressão das amostras de CAA estão apresentadas na Figura 5. Aos 28 dias de cura, o concreto sem o resíduo alcançou uma resistência média de 22,43 MPa, sendo a maior resistência dentre as amostras. Já para a idade de 49 dias, observa-se que houve uma evolução positiva das amostras com 20% de RPP, onde obteve-se uma resistência média de 40,7 MPa, valor maior que as amostras sem o resíduo.

De acordo com Gobbi (2014) apud (Metha e Monteiro, 2008) a reação do material pozolânico com hidróxido de cálcio acontece de maneira lenta, aumentando também o tempo



para liberação de calor na hidratação e no ganho de resistência do concreto, fator que pode ser observado com os resultados nas amostras com 20% de RPP.

Em sua pesquisa com materiais cerâmicos, Shimora (2016) também observa o avanço da resistência à compressão em idades mais avançadas para traços contendo material pozolânico em parte de substituição do cimento, relacionadas a lenta reatividade do material.

Conforme Steiner (2014), o ganho de resistência de algumas amostras contendo o resíduo de RPP, principalmente em idades mais avançadas, está ligado à reatividade do material pozolânico e também ao efeito fíler, o que dá coerência aos resultados, visto que se trata do mesmo resíduo utilizado nessa pesquisa.

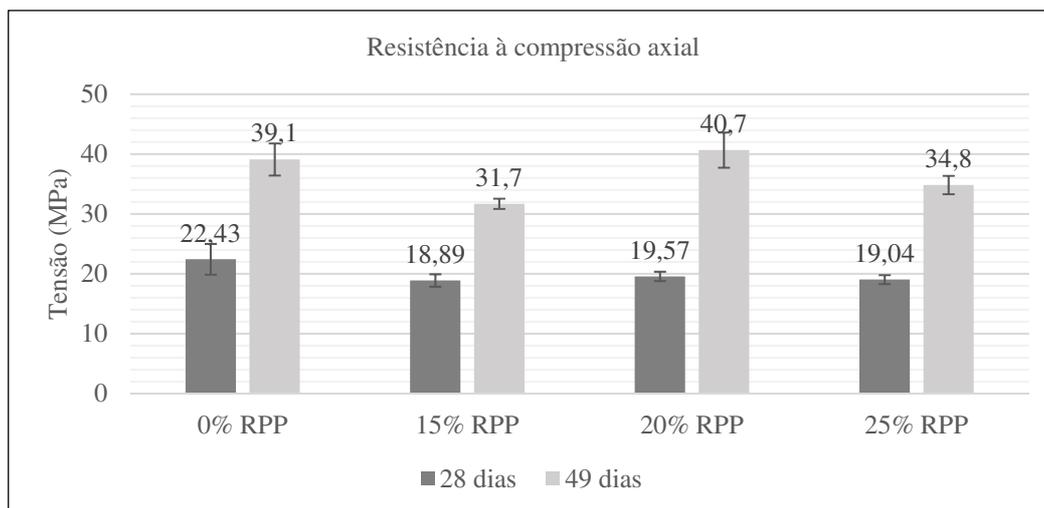


Figura 5. Resistência à compressão.

Com a análise de variância (ANOVA) com 95% de confiança, e pelo método Tukey, é possível analisar que, para a idade de 28 dias, as amostras não contendo RPP diferem-se das amostras com 15% e 25% de resíduo, o que não ocorre com a amostra de 20% de RPP.

A mesma relação ocorre para os 49 dias, e apenas a substituição de 20% de RPP apresenta valores que não se diferenciam das amostras sem o resíduo. É possível observar também que nesta idade a resistência à compressão das amostras com 20% de RPP ultrapassam a média obtida pelas amostras sem RPP.

Em sua pesquisa, Sales (2012) concluiu que a adição de materiais finos que se comportam como fíler precisa de ajustes na relação de aditivos plastificantes, pelo fato de materiais com maior área específica consumirem mais água. A porcentagem de 20% de adição



de cerâmica apresentou melhor desempenho que a referência, e isso, para ele, foi considerada uma quantia ótima de adição, sendo que as amostras com 15% e 40% apresentaram menor desempenho, dando coerência aos resultados desta pesquisa.

O gráfico apresentado na Figura 6 foi elaborado a partir dos resultados obtidos em ensaios de laboratório para determinar os módulos de elasticidade dos corpos de prova a partir da resistência à compressão, conforme a NBR 8522:2017. Os ensaios apresentaram valores satisfatórios para a substituição em 20% do cimento por RPP, onde as amostras alcançaram maior módulo de elasticidade em relação a referência, sendo 38,29 GPa, valor coerente com o resultado de resistência à compressão, e índice de vazios, onde a mesma porcentagem de substituição obteve melhor desempenho.

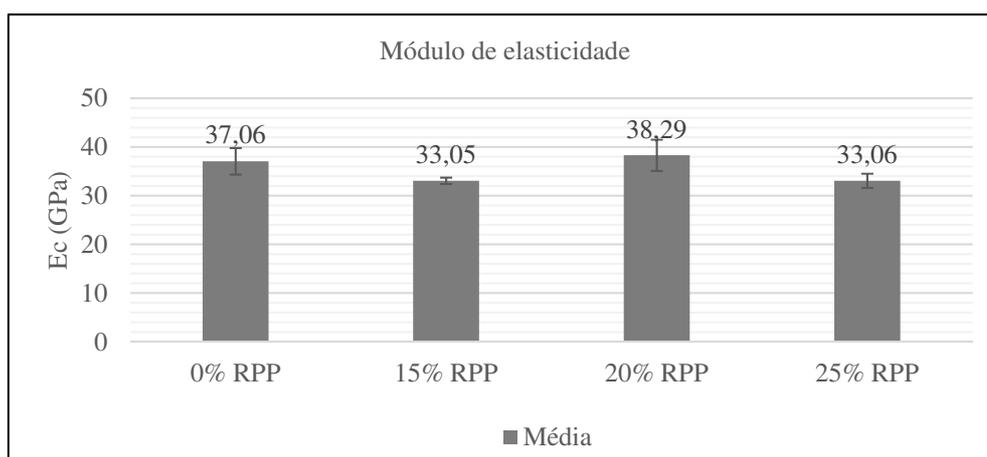


Figura 6. Módulo de elasticidade.

Conclusões

Relativo à caracterização do resíduo, foi possível observar que 80% do material foi passante na peneira de 45 μm e que os elementos químicos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 somaram 97,26%, resultados que estão em conformidade com os requisitos da NBR 12653:2014.

Através da difração de raio-X, concluiu-se que o resíduo possui baixa reatividade pela ausência de helo amorfo do quartzo, que apresenta pico de cristalização consistente na região de 26,5° (em 2 theta).

Em relação à atividade pozolânica, o método de Chapelle modificado traz resultado positivo para a pozolanicidade do RPP, o que é contraditório com o IAP com a cal e com o

cimento Portland, os quais expressaram resultados não satisfatórios perante a norma. Isso pode ter ocorrido pela falta de reatividade do resíduo apresentado no ensaio de DRX, e pela baixa sensibilidade dos métodos diretos.

Diante dos ensaios de propriedades mecânicas, foi possível perceber que as amostras com 15% e 25% apontaram uma menor resistência à compressão aos 28 e 49 dias, respectivamente, de cura em relação à referência, o que pode ser explicado pelos resultados negativos de atividade pozolânica. As amostras com 20% de RPP não possuíam valores com diferença significativa em relação às amostras sem o resíduo, o que pode ser relacionado principalmente ao efeito fíler, visto que as amostras com 20% de substituição de cimento por RPP possuíam o menor índice de vazios. Ainda, é possível observar que, pela mesma razão, as amostras com 20% de RPP também apresentaram maior módulo de elasticidade.

Referente aos aspectos do CAA no estado fresco, os testes realizados indicam que a substituição do cimento por RPP não causou diferença na capacidade passante e no adensamento do concreto.

Assim, pode-se concluir que o RPP atua com bom desempenho na composição para CAA, mesmo sem atender a todos os aspectos a que foi submetido, além de proporcionar qualidades físicas e sustentáveis, ainda que necessite de maiores estudos para viabilizar seu uso em grandes escalas.

Referências bibliográficas

ABRÃO, P. C. R. A. **O uso de pozolânas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água, e indicadores ambientais.** 2017. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2017.

ANFACER. **Associação nacional dos fabricantes de cerâmica para revestimentos, louças sanitárias e congêneres.** São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br/mundial>>. Acesso em: 27 jan. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **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 - ABNT. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos. 6 ed. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 3 ed. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. 2 ed. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3**: Concreto autoadensável Parte 3: Determinação da habilidade passante - Método do anel J. 2 ed. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4**: Concreto Autoadensável Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da caixa L e da caixa U. 2 ed. Rio de Janeiro, 2017.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais Pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. 3 ed. Rio de Janeiro, 2017.

BREITENBACH, S. B. **Desenvolvimento de argamassa para restauração utilizando resíduo do polimento do porcelanato**. 2013. 182 f. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos; Processamento de Materiais a part) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

CALADO, C. F. A. et al. **Concreto Auto-adensável (CAA), Mais do que Alternativa ao Concreto Convencional (CC)**. Pernambuco: Edupe, 2015. 263 p.

DINIZ, H. et al. **Caracterização e avaliação das propriedades de concretos auto-adensáveis com adições minerais e baixo consumo de cimento**. 2018. – Instituto federal de educação, ciência e tecnologia do Rio Grande do Norte. HOLOS, Ano 34, Vol. 05. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/7267>>. Acesso em: 30 agosto. 2019.

IEA, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. 13. ed. Sem City: Sem Ed, 2018. p. 15-40. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2019.

JUENGER, Maria C. G.; SIDDIQUE, Rafat. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement And Concrete Research**, Amsterdam, v. 78, p.71-80, dez. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884615001040>>. Acesso em: 30 mar. 2019.

LIMA, E. E. P. **Concreto auto adensável produzido com resíduo do polimento de porcelanato - Comportamento em relação à corrosão das armaduras**. 2015. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em engenharia civil e ambiental, universidade federal da Paraíba, 2015.

MATOS, P. R. et al. Rheological behavior of Portland cement pastes and self-compacting concretes containing porcelain polishing residue. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v.175, p.8-25, jun.2018. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.212>>. Acesso em: 25 novembro. 2018.

NASCIMENTO, M. V. L. A. **Estudos de blocos intertravados de concreto para pavimentação com incorporação de resíduo do polimento do porcelanato**. 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru-pe, 2016.

SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. dos S. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 113-125, jan./mar. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

SALVO, M.; RIZZO, S.; CALDIROLA, M.; NOVAJRA, G.; CANONICO, F.; BIANCHI, M & FERRARIS, M. Biomass ash as supplementary cementitious material (SCM), **Advances in Applied Ceramics**, 114:sup1, p.2-3, Torino, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1179/1743676115Y.0000000043>>. Acesso em: 25 Jul. 2019.

SHIROMA, L. **Atividade pozolânica de resíduos de isoladores de porcelana em matrizes cimentícias**. 2016. 1 recurso online (139 p.). Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/322657>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

SILVA, G. J. B. "**Estudo do Comportamento do Concreto de Cimento Portland produzido com a Adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato**". 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia da Ufmg, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2005. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-8DJHLC/guilherme_jorge_brigolini_silva.pdf?sequence=1>. Acesso em: 23 fev. 2016.

SNIC, SINDICADO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO (Rio de Janeiro). **História**. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/historia.asp>>. Acesso em: 16 jan. 2019.

STEINER, L. R.. **Efeito do resíduo do polimento de porcelanato como Material Cimentício Suplementar**. 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul de Santa Catarina, Criciúma, 2014.

TENNICH, M.; OUEZDOU, M. B.; KALLEL, A. Thermal effect of marble and tile fillers on self-compacting concrete behavior in the fresh state and at early age. **Journal of Building**

Engeneering, Vol.50 ,p.1-7, 2018 .Disponível em:
<<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.06.015>>.

TOKUDOME, S. **Contribuição para o desenvolvimento do concreto auto-adensável**. 2006. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concreto auto-adensáveis**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

VENUGOPAL, B. Development and Performance Evaluation of Coir Pith Ash as Supplementary Cementitious Material in Concrete. **J. Eng. Technol. Sci**, Tamilnadu, Vol. 50, p.2-3, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5614/2Fj.eng.technol.sci.2018.50.6.8>