

Desenvolvimento e caracterização de concretos produzidos com substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de cabos de plataformas de petróleo

Development and characterization of concretes produced by replacing fine aggregate with residues from oil rig mooring cables

Carlos Ivan Ribeiro de Oliveira¹, Nancy Isabel Alvarez Acevedo¹,
Marisa Cristina Guimarães Rocha¹, Icaro Delgado de Souza²,
Victor Manuel Tamé Reyes², Joaquim Teixeira de Assis²

¹Laboratório de Tecnologia de Polímeros, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua Bonfim 25, Bloco 1, Sala 115, CEP: 28625-579, Nova Friburgo, RJ, Brasil.

²Laboratório de Ensaios Físicos, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua Bonfim 25, Bloco 1, Sala 111, 28625-579, Nova Friburgo, RJ, Brasil.

e-mail: carlosivanr@gmail.com, nacevedo@iprj.uerj.br, mrocha@iprj.uerj.br, icarodelgadodesouza@gmail.com, victor.iprj@gmail.com, joaquim@iprj.uerj.br,

RESUMO

A incorporação de resíduos e a redução do teor de agregados minerais em formulações de concreto são ações que contribuem para a preservação ambiental. O objetivo desse estudo é desenvolver e avaliar as propriedades e a porosidade de concretos formulados com resíduos, provenientes de cabos usados em linhas de amarração de plataformas de petróleo. Com essa finalidade, os resíduos foram caracterizados utilizando técnicas tradicionalmente utilizadas em materiais. Corpos de prova de concretos de traço padrão 1,0: 2,3: 2,7: 0,55 (cimento: areia: brita: água) (NBR 5738) foram preparados e usados como referência. Para avaliar o efeito da incorporação dos resíduos no desempenho dos concretos, corpos de prova com teores de substituição parcial de 5% e 10% do agregado miúdo por resíduos foram preparados, e submetidos a ensaios de resistência à compressão axial (NBR 5739) e de absorção de água (NBR 778). A porosidade dos concretos foi determinada a partir de imagens obtidas em escâner comercial. Os resultados mostraram que os resíduos eram constituídos por poli (tereftalato de etileno), PET. O concreto formulado com teor de substituição de agregado miúdo por 5% de PET apresentou leve tendência ao aumento da resistência. A substituição de 10% do agregado por PET, entretanto, reduziu a resistência do concreto. Os valores de porosidade do concreto de referência e do formulado com substituição de 5% de agregado por PET apresentaram relação condizente com os valores de resistência à compressão. A metodologia adotada se mostrou satisfatória para a determinação de poros do tipo vazios de ar presentes na estrutura do concreto. As curvas de resistência versus porosidade baseadas nos modelos de Powers e Riyshkevitch demonstraram que essa metodologia pode ser utilizada para determinar a resistência à compressão de concretos com porosidade menor que 20%. O concreto formulado substituindo o agregado miúdo por 5% de PET apresenta resistência compatível com a do material de referência.

Palavras-chave: Concreto. Resíduos. Porosidade. Processamento de imagens. Resistência à compressão

ABSTRACT

In recent years, the high consumption of non-renewable natural resources and energy associated with the generation of solid waste has encouraged the development of sustainable materials for civil construction. In this context, some studies on the use of polymeric residues in the formulation of concrete-based materials have been published. These residues can minimize the use of mineral aggregates, in addition to providing some desired properties to the materials obtained. Porosity is one of the most important parameters of the concrete

Autor Responsável: Nancy Isabel Alvarez Acevedo

Data de envio: 24/10/2020

Data de aceite: 06/03/2021

microstructure, as it is intrinsically related to some properties of this material, such as compressive strength. The objective of this work is to evaluate the properties and porosity of a concrete formulated with different contents of poly(ethylene terephthalate) (PET) obtained from mooring cables of discarded oil platforms. The characterization of the polyester waste by different techniques showed that residue from mooringropes is comprised of PET. The mechanical evaluation of the concretes was performed by compression strength tests. The results showed that the addition of 5 % PET to the concrete formulations has a tendency to improve the mechanical strength of the materials. The porosity of each concrete sample was determined from images acquired from commercial scanner. Empirical equations were applied to relate the porosity data obtained to the compressive strength of the samples. The curves obtained matching with the inverse relationship between these two parameters.

Keywords: Concrete. Residues. Porosity. Image processing. Compressive strength

1. INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é definido como uma mistura homogênea de cimento, agregados e água, efetuada com ou sem incorporação de aditivos químicos ou outros componentes minoritários [1]. A qualidade e o teor desses materiais afetam de forma significativa o desempenho do concreto, tanto no seu estado fresco como endurecido, sendo a resistência à compressão, a propriedade mecânica mais sensível às mudanças na composição da mistura[2].

O concreto de cimento Portland é o material mais utilizado na construção civil, devido a sua alta resistência à compressão, alta durabilidade e baixo custo. Apresenta, entretanto, algumas limitações, como: fragilidade e baixa deformação na ruptura quando solicitado em tração [3,4]. Além disso, o ciclo de produção de concreto envolve a utilização de grande quantidade de materiais provenientes de fontes naturais não renováveis e elevada emissão de CO₂ [5,6]. Por outro lado, o elevado consumo de produtos a base de polímeros sintéticos também contribui para a redução de recursos naturais não renováveis, assim como para o aumento da poluição ambiental (emissão de gases e produção de resíduos ou rejeitos). Como os materiais poliméricos não decompõem ou degradam facilmente, há uma grande preocupação com a disposição final dos resíduos dos artefatos produzidos [7].

Dentro desse contexto, uma série de estudos vêm sendo realizadas nos últimos anos, envolvendo a utilização de materiais poliméricos na formulação de concretos, visando principalmente o aumento da resistência à fissuração, a redução no consumo de agregados minerais e do impacto ambiental gerado pelo descarte inadequado desses resíduos [3,4,7-11]. Polipropileno (PP), polietileno (PE), poli(álcool vinílico) (PVA), poli(cloreto de vinila) (PVC), nylons, aramidas e poliésteres, principalmente sob a forma de fibras curtas, são os polímeros atualmente mais utilizados na formulação de concretos [12-16].

Diversos trabalhos publicados na literatura mostram que a resistência à compressão de concretos apresenta pouca ou nenhuma variação com a adição de fibras poliméricas [3,12-14,16,17]. AMARAL *et al.* [14], observaram que a adição de fibras de PP à massa de concreto não afeta a resistência à compressão, enquanto que a adição de fibras de polietileno de alto módulo (PEAM) promove a redução da resistência à compressão. Os autores atribuíram esse comportamento a uma melhor dispersão das fibras de PP no concreto e a presença de nódulos de fibras de PEAM que podem ter atuado como concentradores de tensões nos corpos de prova.

KIM *et al.* [3] avaliaram os efeitos do tipo de fibra, poli (tereftalato de etileno) (PET) e PP, e o efeito dos teores de fibra adicionados, 0,5%, 0,75% e 1%, no comportamento do concreto. As fibras de PP utilizadas foram fibras comerciais com a superfície frisada. As fibras de PET provenientes de rolos de PET reciclado, tiveram sua superfície frisada e recoberta com PP graftizado com anidrido maleico. Ambos os tipos de concretos obtidos exibiram redução da resistência à compressão e do módulo elástico, na medida em que o teor de fibra incorporada era aumentado. Os autores comprovaram também que o uso de fibras de PET como reforço em concretos retarda o aparecimento de fissuras originadas por retração por secagem.

EHRENBRING *et al.* [17] investigaram os efeitos da inserção de fibras de poliéster novas e recicladas na retração por secagem de concretos. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que a inserção de fibras no concreto de referência não afetou a resistência a compressão e reduziram o potencial de fissuração dos concretos. Os concretos contendo fibras de poliéster apresentaram valores das tensões de retração por secagem de quase o dobro do valor apresentado pelo concreto sem fibras. A inserção de fibras de poliéster recicladas no concreto promoveu uma redução de aproximadamente 80% na formação de fissuras na matriz quando comparada com os efeitos da inserção de fibras de poliéster virgens.

Há resultados, entretanto, que mostram um aumento da resistência à compressão do concreto com aumento do teor do polímero incorporado. KAKOOEI *et al.* [15] avaliaram o efeito da fibra de PP nas propriedades de estruturas de concreto reforçado. Os resultados obtidos mostraram que a resistência à compressão au-

menta proporcionalmente com o incremento do teor de PP. A presença de fibras de PP também promove redução da permeabilidade e consequentemente retarda o início do processo de degradação do concreto.

De acordo com a literatura, reforçar o concreto através da incorporação de fibras de PET recicladas é considerado uma tecnologia competitiva, quando se visa melhorar a resistência térmica, mecânica (em compressão e em tração) e a ductilidade do concreto. PELISSER *et al.* [18] mostraram que a incorporação de 1% de fibras de poliéster ao concreto causa um aumento de 75% da resistência ao impacto, de 9% da resistência à tração, de 7% da resistência à flexão e de 5% da resistência à compressão.

Porém, resultados controversos têm sido reportados na literatura relativos ao uso de PET proveniente de garrafas pós-consumo, na produção de concreto de cimento Portland. Alguns autores relatam que incorporar esses resíduos ao concreto, em substituição ao agregado miúdo, reduz o desempenho do concreto [19-21]. No entanto, há possibilidade de se encontrar o teor adequado de agregado miúdo que pode ser substituído pelo polímero, de forma a se obter um material que preencha os requisitos técnicos de qualidade exigidos a uma dada aplicação [21-24]. Há indicações de que a incorporação de PET até um limite de 5% em substituição de areia, não afeta a trabalhabilidade do concreto nem afeta de forma significativa a resistência à compressão [8, 22].

MODRO *et al.* [20] observaram uma redução da resistência à compressão em concretos produzidos com diferentes frações volumétricas de resíduos de PET pós-consumo, independente do formato e da origem dos resíduos. Os autores utilizaram dois tipos de resíduos: (i) “areia” proveniente do refugo do processo de reciclagem de embalagens, com tamanho menor que 4,8 mm; e (ii) “flocos” (*flake*) provenientes de fitas de fixação de mercadoria em *pallets*, em forma de laminas. Os autores atribuíram esse resultado à menor resistência mecânica intrínseca dos polímeros comparada à apresentada pelos agregados minerais e à porosidade gerada pela menor interação química entre o polímero e a matriz cimentícia.

AHMAD *et al.* [21] avaliaram o potencial da utilização dos resíduos de PET como agregados, na fabricação de concretos para produção de pisos intertravados para circulação de pedestres. Os resíduos de PET, lavados e picotados, substituíram a areia fina nas proporções de 5%, 10% e 15%. Os concretos produzidos apresentaram redução dos valores da resistência à compressão axial, na medida em que o teor de substituição de areia por PET aumentava. Os autores observaram também que ajustando o teor de resíduos, o valor de resistência à compressão requerido para os concretos destinados à produção de blocos de pavimentação pode ser obtido. RAHMANI *et al.* [8] avaliaram a resistência à compressão de concretos formulados com substituição de teores de 5%, 10%, 15% e 20% de areia por resíduos de PET, utilizando duas relações água/cimento: 0,42 e 0,50. Os resultados mostraram que a resistência à compressão tende a aumentar quando um menor teor de PET é usado em substituição à areia (5%) e decresce quando maiores teores de polímero são utilizados.

OLIVEIRA *et al.* [23] avaliaram a substituição de 10%, 15% e 20% em massa do teor de pó de pedra utilizado na preparação de concreto para fabricação de pisos intertravados (*pavers*) por resíduos de PET triturado, com diâmetro máximo de 6 mm. Os ensaios de resistência à compressão aos 28 dias mostraram que um percentual de substituição de 10% é suficiente para produzir concretos com a resistência de 35 MPa, que é a resistência mínima exigida para produção de *pavers*. Todos os percentuais de substituição resultaram em ganhos na resistência à compressão dos concretos, possibilitando a sua utilização para fins estruturais.

Há diversos fatores, como granulometria dos materiais, umidade, massa específica, área superficial, módulo de finura, entre outros, que afetam o desempenho dos concretos contendo resíduos poliméricos, o que pode explicar os resultados contraditórios sobre o efeito da substituição parcial do agregado miúdo por PET.

O poli (tereftalato de etileno) (PET), inserido como substituto parcial de agregados minerais em formulações de concreto de cimento Portland, se apresenta como uma alternativa viável para obtenção de concretos com propriedades otimizadas para uma dada aplicação, agregando valor ao material obtido e reduzindo impactos ambientais adversos [18,20-24]. Apesar de o PET ser mais utilizado sob a forma de fibras na formulação de concretos, o uso de resíduos de PET sob a forma de grânulos é o meio mais viável do ponto de vista econômico para o reaproveitamento e consequentemente, da redução do impacto ambiental causado pelo descarte de materiais a base desse polímero [8].

A substituição de cabos de plataformas marítimas confeccionadas em aço por cabos fabricados a partir de polímeros tem se tornado cada vez mais usual, devido à necessidade de obtenção de plataformas mais leves para a indústria do petróleo. Os cabos de poliéster são os cabos mais utilizados nos sistemas de ancoragem das plataformas de petróleo em águas profundas e muito profundas (500 - 2000 metros), que requerem linhas de amarração mais leves e resistentes e economicamente mais viáveis. Os cabos constituídos basicamente de fibras de poliéster a base de resina PET apresentam uma excelente combinação de propriedades (densidade, resistência química, durabilidade, resistência mecânica e custo) sendo considerado como a melhor opção frente a outras fibras como substituto dos cabos de aço, nas linhas de amarração utilizadas nessas profundidades [25].

A Petrobras foi a pioneira no uso de cabos de poliéster em explorações petrolíferas em águas profundas, e conta com plataformas instaladas ao longo da costa brasileira, que iniciaram suas atividades nos finais dos anos 90. Isso significa que a maior parte das plataformas se encontra no final de sua vida útil em serviço. A vida útil de uma plataforma é de 20-25 anos. O descomissionamento dessas plataformas flutuantes gera resíduos pós-consumo, entre os quais, os cabos de poliéster usados nas linhas de amarração. Dado ao seu alto valor agregado, esses cabos não podem ser descartados como lixo [26]. Sendo assim, iniciativas que visem à reutilização do PET proveniente da desmontagem desses cabos são bastante relevantes. Uma alternativa é sua aplicação como agregado em concretos.

A porosidade é um dos componentes mais importantes da microestrutura do concreto e pode ser definida como a capacidade de um material apresentar poros ou vazios [27], sendo representada pela razão entre a fração de espaços vazios e o volume total da amostra considerada. Diversos fatores são responsáveis pela porosidade em concretos, sendo a relação água/cimento considerada um dos fatores mais significativos. Além disso, a porosidade é inversamente proporcional a uma das propriedades mecânicas mais importantes do concreto: a resistência mecânica à compressão [28]. A determinação da porosidade do concreto torna-se assim, uma medida importante na avaliação da durabilidade e resistência desses materiais [29,30].

Diferentes técnicas de análise são utilizadas para determinar a porosidade em concretos endurecidos. As técnicas mais amplamente utilizadas são a porosimetria por intrusão de mercúrio, o método de adsorção de nitrogênio e análise de imagens. O desenvolvimento de métodos baseados em análises de imagens digitais para o estudo da porosidade e resistência à compressão de amostras de concreto é objetivo de vários trabalhos que vêm sendo realizados nos últimos anos pela equipe multidisciplinar do IPRJ [30-34]. Nesses métodos são utilizadas imagens obtidas através de microtomografia de raios-X e escâneres, em conjunto com programas de processamento de imagens, para obtenção de valores aproximados da porosidade superficiais e a resistência à compressão dos concretos. Considerando que a forma e as dimensões dos poros também exercem influência nas propriedades dos concretos, a metodologia desenvolvida por SOUZA [33] permite determinar a porosidade e as características dos poros presentes na estrutura do concreto a partir de imagens obtidas em um escâner comercial.

O presente trabalho tem como objetivo a produção e caracterização de concretos formulados com substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de poliéster oriundos de cabos de plataformas marítimas utilizadas na indústria de petróleo. Nesse sentido, visa avaliar o efeito do teor de substituição dos resíduos de poliéster nas propriedades do concreto, obtidas em ensaios padronizados de corpos cilíndricos. Especial atenção tem sido dada à determinação da porosidade e características dos poros presentes na estrutura dos concretos com e sem substituição do agregado miúdo, a partir de imagens obtidas em escâner comercial. Outras propriedades, tais como tenacidade e resistência a álcalis serão avaliadas em futuros trabalhos.

Esse trabalho é parte de um projeto de pesquisa elaborado visando contribuir com soluções alternativas de reaproveitamento dos resíduos pós-consumo gerados pelo descomissionamento de plataformas marítimas, especificamente dos cabos de poliéster. Espera-se como resultado final da série de estudos programados, identificar potenciais soluções tecnológicas mais competitivas para a construção civil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O Portland de Alta Resistência Inicial, CP V-ARI, NBR 5733 [35], VOTORAN, da Votorantim Cimento Ltda. foi o cimento utilizado. Este cimento atinge altas resistências já nos primeiros dias da aplicação.

Os agregados utilizados foram selecionados com base nas opções disponíveis no mercado local e utilizados no estado de fornecimento. A brita de calcário com tamanho máximo de partícula de 19 mm foi utilizada como agregado graúdo, e a areia fina natural como agregado miúdo. A água de amassamento utilizada foi proveniente da rede de abastecimento do Município de Nova Friburgo. O aditivo plastificante (0,6 %) utilizado foi o aditivo líquido polifuncional para concretos, BAUTECH POLI 3, da BAUTECH Indústria e Comércio de Tintas Ltda., de massa específica 1,18 g/cm³.

Os resíduos de poliéster na forma de grânulos provenientes de cabos usados nas linhas de amarração de plataformas de petróleo foram fornecidos pela empresa M.B.B. Enterprises, Inc., Advanced Industrial Fiber Technology. Como pode ser observado na Fig. 1, a forma dos grânulos de PET é bastante irregular e com dimensões não maiores que 20 mm.

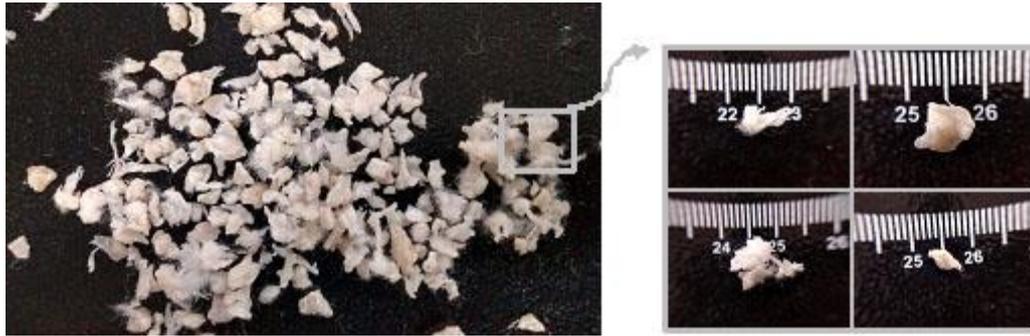


Figura 1: Aspecto dos resíduos de cabos de poliéster utilizados em substituição parcial do agregado miúdo nos concretos (dimensões em mm).

2.2 Caracterização dos resíduos poliméricos

De forma a determinar a composição dos resíduos, amostras foram caracterizadas através da técnica de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e das técnicas de análise térmica: calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análise termogravimétrica (TGA).

A composição química dos resíduos de poliéster foi determinada a partir dos espectros FTIR obtidos em espectrômetro Varian Excalibur 2100 FT-IR, com acessório de refletância total atenuada e cristal de seleneto de zinco, na faixa de número de onda de 4000 cm^{-1} a 600 cm^{-1} e resolução de 2 cm^{-1} .

A estabilidade térmica do resíduo foi avaliada por termogravimetria em analisador termogravimétrico TA Instruments - Q500. O ensaio foi efetuado através de aquecimento da amostra de 30 a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, com taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e sob atmosfera de nitrogênio.

As propriedades térmicas dos resíduos foram determinadas através das curvas calorimétricas obtidas em calorímetro exploratório diferencial TA Instruments, DSC Q1000. Aproximadamente 7 mg da amostra foram aquecidos até $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ e mantidos nesta temperatura por 5 minutos, sendo então resfriados a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ sob taxa de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, para obtenção da temperatura de cristalização (T_c). Após essa etapa, a amostra foi submetida ao mesmo programa de aquecimento, e os valores da temperatura de fusão (T_m) e da entalpia de fusão (ΔH_f) foram então determinados a partir dessa segunda corrida. O grau de cristalinidade da amostra foi calculado a partir da entalpia de fusão teórica igual a 140 J/g [36] de um tipo de poli (tereftalato de etileno) 100% cristalino.

2.3 Formulação das misturas de concreto e preparação dos corpos de prova

Testes laboratoriais preliminares foram realizados para definir o traço padrão utilizado ao longo do desenvolvimento do trabalho. Um traço inicial de 1:2,3:2,7:0,62 (cimento:areia:brita:água) foi adotado de acordo com o trabalho realizado por PELISSER *et al.* [18]. Outros dois traços foram formulados, variando a relação a/c (água/cimento) de 0,62 para 0,55 e 0,50. A escolha do traço padrão foi baseada na avaliação da trabalhabilidade e resistência mecânica dos concretos preparados.

Definido o traço padrão, dois (2) outros traços foram formulados, nos quais houve a substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de poliéster em teores de 5% e 10% em volume. Cada um dos traços foi desenvolvido em uma única dosagem.

As massas de concreto foram preparadas em betoneira CSM, CS de 130 litros. Todos os materiais foram pesados previamente antes do início do amassamento. Com a betoneira em funcionamento contínuo, os materiais foram adicionados, de acordo com a sequência: brita, água de amassamento e aditivo, cimento e areia ou areia e resíduo de poliéster. O tempo total de amassamento gasto para cada mistura foi de 5 minutos.

Corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro \times 20 cm de altura foram moldados e curados de acordo com o procedimento especificado na NBR 5738 [37].

2.4 Ensaio de abatimento do tronco de cone

O ensaio de abatimento do tronco de cone foi realizado imediatamente após o término da preparação da massa de concreto, de acordo com o procedimento especificado na NBR NM67 [38]. Este ensaio, também conhecido como *Slump Test*, é realizado para verificar a trabalhabilidade do concreto fresco, através da determinação da consistência da mistura preparada.

2.5 Ensaio de resistência à compressão axial

Para determinar a resistência à compressão axial dos diferentes concretos preparados utilizou-se a prensa eletro-hidráulica digital Soloteste de 100 tf e foram adotados os procedimentos indicados pela NBR 5739 [39].

Os corpos de prova dos concretos formulados para determinação do traço padrão foram ensaiados com idade de 7 dias.

Em geral os trabalhos apresentados na literatura relacionados ao uso de resíduos de PET no concreto estão baseados em resíduos provenientes de garrafas de refrigerante. Não há trabalhos utilizando resíduos de PET na forma de grânulos provenientes de cabos de plataforma marítima como agregado miúdo em concretos. É válido ressaltar que o fato de usar corpos de prova com tempos de cura maiores de 7 dias, como especificado pela norma para cimentos CPV-ARI, tem como objetivo avaliar a influência do teor de substituição do agregado miúdo por resíduos de PET nas diferentes propriedades do concreto e a sua evolução ao longo do tempo. PELISSER *et al.* [18] utilizaram corpos de prova com idades de 28 e 150 dias para avaliar as propriedades do concreto reforçado com fibra de PET de garrafa reciclada, que são suscetíveis à degradação eventual dessas fibras a longo prazo. Alguns autores recomendam avaliar o concreto na idade 360 dias, em virtude da possibilidade dos resíduos de PET sofrerem degradação alcalina na massa de concreto [40].

Com o intuito de avaliar o efeito da substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de poliéster na evolução da resistência a compressão axial dos concretos produzidos, os corpos de prova do concreto padrão e dos concretos contendo resíduos de poliéster foram ensaiados com idades de 7, 14, 28 e 150 dias. Os concretos desenvolvidos de acordo com cada um desses traços deram origem a 20 corpos de prova, 5 para cada idade.

2.6 Determinação da absorção de água

A determinação da absorção de água das amostras de concretos endurecidos foi realizada de acordo com as orientações da NBR 9778 [41]. Quatro (4) corpos de prova referentes aos concretos formulados com cada traço na idade de 150 dias foram ensaiados.

2.7 Preparação de amostras e aquisição de imagens para avaliação da porosidade

Três (3) corpos de prova com idade de 28 dias de cada concreto produzido foram utilizados para avaliação da estrutura porosa dos concretos. A Fig. 2 mostra o procedimento de preparação de amostras dos corpos de prova e a obtenção das imagens por escâner para avaliação da porosidade dos concretos preparados.

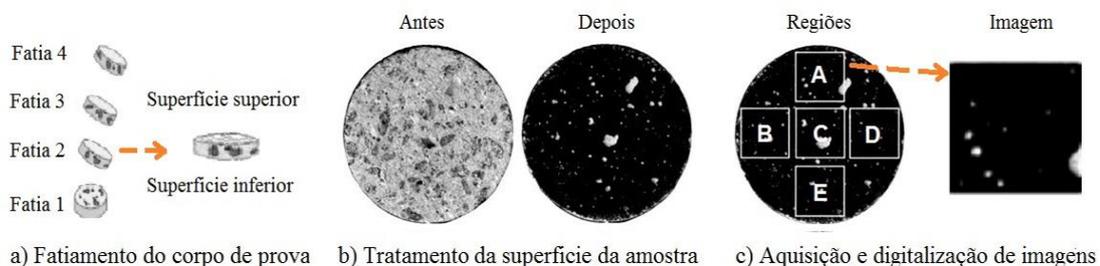


Figura 2: Preparação de amostras e obtenção das imagens.

Quatro fatias de igual altura, cortadas paralelamente às bases dos corpos de prova cilíndricos, foram então obtidas a partir dos corpos de prova. As fatias e as superfícies de corte foram identificadas como se mostra na Fig. 2(a). Posteriormente, cada superfície de corte foi pintada com tinta preta fosca e os poros foram preenchidos com gesso na forma de pasta, para melhorar o contraste na imagem digitalizada, Fig. 2(b). Para cada traço de concreto, 18 amostras foram geradas.

Imagens digitalizadas de cada amostra foram obtidas se utilizando o escâner de mesa HP DESKJET F4180, resolução óptica de 1200×2400 dpi (*dot per inch* – pontos por polegada), cores de 48 bits, 256 níveis de cinza (escala de 8 bits). Cada amostra foi digitalizada em 5 regiões diferentes, como se mostra na Fig. 2(c), com resolução de pixel de 2400 dpi e salvas em arquivo JPG. Um total de 60 imagens foi obtido para cada traço de concreto.

2.8 Processamento qualitativo das imagens digitalizadas

Para o processamento e análise das imagens digitais foi utilizado o programa desenvolvido em ambiente MATLAB pelo grupo de pesquisa do IPRJ, de acordo com a metodologia descrita na literatura [33]. O programa faz uso de técnicas convencionais do processamento e análise de imagens digitais. Imagens que apresentaram

regiões correspondentes a defeitos de corte e rugosidades foram descartadas do processo. A Fig. 3 mostra as fases do processamento qualitativo de uma imagem.

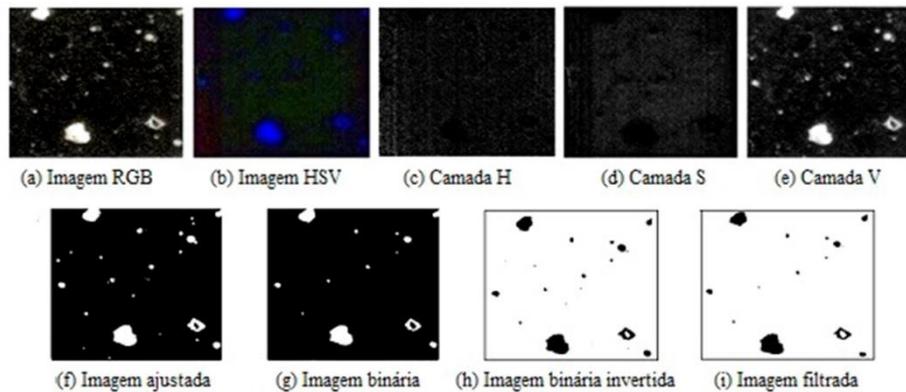


Figura 3: Fases do processamento qualitativo de uma imagem adquirida no escâner [33].

As imagens adquiridas através do escâner são geradas no padrão do espaço de cores RGB (vermelho-Red, verde-Green e azul-Blue). Nesse formato, não é possível identificar claramente os poros em nenhuma das suas camadas [31]. Um espaço de cor mais adequado é o HSV (matiz (H), saturação (S), valor(V)), que é uma transformada não linear do espaço de cor RGB [42]. A componente H está relacionada à cor da imagem; a componente (S) à concentração da cor; e a componente V ao brilho. Sendo assim, após a imagem de entrada ser lida, há a sua conversão do formato RGB para o HSV, seguida da separação nas componentes H, S e V.

Posteriormente, há uma operação de ajuste de contraste no modo alargamento na camada V, para tornar as posições que representam os vazios ou poros mais distinguíveis [33]. Em seguida, a imagem ajustada é submetida à operação de binarização de segmentação por limiarização global, com valor de limiar 0,6, seguida de uma operação de inversão da escala de cinza. O objetivo é definir todos os objetos de interesse (poros) e facilitar a caracterização estrutural.

A imagem binária apresenta dois níveis de luminosidade: o preto (valor 0) para valores de intensidade menores que 0,6 representando o fundo, e o branco (valor 1) para valores maiores de 0,6, representando os poros ou vazios. Ao inverter o nível de cinza, o preto é atribuído aos poros e o branco ao fundo da imagem.

Finalmente, um processo de filtragem é utilizado para eliminar pontos isolados, considerado como ruídos. Para isto, é aplicada a operação de abertura com elemento estruturante circular de raio de três pixels. O elemento estruturante, EE, é um conjunto de pixels de forma e tamanho definidos. Neste trabalho, o EE é uma matriz bidimensional de valores 0's e 1's. O pixel central identifica o pixel de interesse. Os pixels com valor de 1's definem a vizinhança [43].

2.9 Processamento quantitativo das imagens

Nessa etapa, a imagem obtida deve ser capaz de fornecer os parâmetros individuais do objeto de interesse. Com esse propósito é aplicada a operação de rotulação de componentes 8-conectados. Em uma imagem binária, dois pixels apresentam conectividade-8 ou são 8-conectados, quando possuem o mesmo valor e são vizinhos na direção horizontal ou vertical ou nas diagonais [44].

Na rotulação, os pixels adjacentes que apresentam conectividade-8 são agrupados, e a cada agrupamento é atribuído um nível de cinza único, ou seja, um rótulo [33].

Identificados os poros, se procede à extração de características. Nessa etapa, a área, a orientação e a excentricidade do poro são calculadas. O algoritmo desenvolvido com essa finalidade faz uso da técnica de momentos da imagem, também conhecida como momentos estatísticos. Os momentos da imagem mais utilizados são os momentos regulares [45].

A partir do momento regular de ordem zero, m_{00} , a área dos poros na imagem é calculada usando a Eq. 1, [45]:

$$\text{Área do poro} = m_{00} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x^0 y^0 f(x, y) \quad (1)$$

onde $f(x, y)$ é a função intensidade que dá o tom de cinza ao pixel (x, y) , a que apresenta o valor "1" caso o pixel pertença ao poro e o valor "0" quando o pixel não pertence ao poro. M é o número de pixels na direção

X , e N é o número de pixels na direção Y ; ou largura e altura da imagem, respectivamente.

A excentricidade (Exc) pode ser obtida a partir da relação entre os autovetores máximo (λ_{max}) e mínimo (λ_{min}) da matriz de covariância, que descreve a distribuição dos pontos bidimensionais (coordenadas x e y) relacionadas ao objeto de interesse. Esses autovetores são obtidos a partir da Eq. (2) [45]:

$$\lambda_{\max,\min} = \frac{(\mu_{20} + \mu_{02}) \pm \sqrt{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2}}{2} \quad (2)$$

onde, μ_{20} , μ_{02} e μ_{11} são momentos centrais '20' e '11'.

A excentricidade do poro é calculada com o uso da Eq. (3), [33]:

$$Exc = \sqrt{\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}} \quad (3)$$

onde: λ_{\max} e λ_{\min} são os eixos maior e menor, respectivamente, de uma elipse, calculados como na Eq. 2.

A orientação do poro é obtida da Eq. 4, [33]:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{\max} - \mu_{20}}{\mu_{11}} \right) \quad (4)$$

onde: θ é o ângulo entre o eixo do poro e o eixo x da imagem.

Calculados os parâmetros característicos dos poros, são gerados os gráficos de distribuição dos poros em função de cada um desses parâmetros. METHA e MONTEIRO [28] consideram que poros com tamanhos superiores a 50 nm afetam negativamente a resistência mecânica dos concretos, principalmente os vazios de ar de maior tamanho, que podem apresentar diâmetros de até 3 mm. Considerando a resolução das imagens obtidas no scanner, onde 1 pixel representa uma área de 10^{-4} mm^2 , a metodologia utilizada permite a captura de poros de tamanhos maiores de 50 nm. Os vazios de ar podem apresentar uma área máxima de $7,07 \text{ mm}^2$ ($7,07 \times 10^4$ pixels), considerando que geralmente apresentam formato esférico. Logo vazios que apresentem áreas maiores de $7,07 \text{ mm}^2$ podem ser discriminados e quantificados durante o processo de captura de poros.

Uma análise da distribuição de tamanhos de poros permite quantificar a porcentagem de poros de ar presentes na estrutura do concreto. A análise das curvas de distribuição de poros em função da excentricidade e a orientação dos elementos rotulados na imagem possibilita verificar se os elementos avaliados são realmente vazios de ar e desse modo aprimorar a determinação da porosidade nos concretos [33].

Finalmente, a porosidade é obtida simplesmente pela razão entre área ocupada pelos poros e a área da imagem. Após obtenção dos valores de porosidade de cada imagem, foi calculada a porosidade média de cada concreto e o desvio padrão associado. Maiores detalhes da metodologia aqui descrita podem ser obtidas na referência [33].

2.9 Curvas resistência versus porosidade

ZHAO *et al.* [29], consideram indispensável se estabelecer a relação entre a resistência e a estrutura porosa dos materiais baseados em cimento. Diferentes relações e modelos têm sido apresentados e traduzidos em equações que tentam prever o desempenho do concreto. Seguindo uma abordagem empírica, diversos métodos têm sido desenvolvidos objetivando relacionar a porosidade com a resistência em materiais sólidos [29,34,46].

Neste trabalho serão utilizados as fórmulas, Tabela 1, dos modelos de Hasselman, Powers, Ryshkevitch e Schiller empregadas em trabalhos anteriores do grupo de pesquisa [34], objetivando determinar a efetividade da metodologia utilizada na determinação da porosidade de concretos a partir de imagens obtidas se utilizando um escâner comercial.

Inicialmente, o valor da resistência intrínseca à porosidade zero da equação de Hasselman (σ), da equação de Powers (a), da equação de Ryshkevitch (s_0) ou a constante K (equação de Schiller) é determinado se utilizando os valores da porosidade média obtida a partir das imagens e os valores da resistência à compressão axial média determinada em corpos de prova com idade de 28 dias [34].

Obtidas as equações para cada tipo de concreto foram geradas as respectivas curvas que correlacionam a porosidade com a resistência à compressão axial.

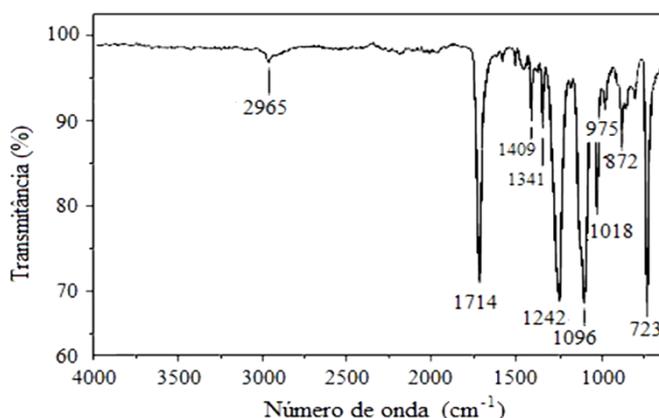
Tabela 1: Fórmulas empíricas utilizadas para determinação das curvas resistência *versus* porosidade [34].

MODELO	EQUAÇÃO	PARÂMETROS
Hasselmann	$\sigma_0 = \sigma(1 - kp)$	σ_0 : resistência à compressão aos 28 dias; σ : resistência intrínseca para a porosidade zero; k : constante = 2,6 a 3,0, dependendo do tipo de cimento; p : porosidade.
Powers	$f_c = ax^3$	f_c : resistência à compressão do concreto aos 28 dias; a : resistência intrínseca do material com porosidade zero; x : relação gel-espaço na pasta completamente hidratada = $(1 - p)$, e p : porosidade capilar.
Ryshkevitch	$s = s_0 e^{-kp}$	s : resistência do material com porosidade p ; s_0 : resistência intrínseca para a porosidade zero; k : constante = 2,6 - 3,0, em função do tipo de cimento.
Schiller	$f_c = K \ln(p_0/p)$	f_c : resistência à compressão aos 28 dias; K : constante empírica. p_0 : porosidade a força zero = $1 - \Phi_{média}$ e $\Phi_{média}$: porosidade média;

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos resíduos

A Figura 4 apresenta as bandas de absorção no infravermelho dos resíduos de cabos de plataforma.


Figura 4: Espectro de absorção no infravermelho dos resíduos provenientes de cabos de plataforma.

Destacam-se no espectro, as bandas situadas em: 1714 cm^{-1} , atribuída ao estiramento da ligação $\text{C}=\text{O}$ dos grupos funcionais de ácidos carboxílicos; 1096 cm^{-1} , atribuída ao estiramento da ligação $\text{C}-\text{O}$ presente nos grupos ésteres; 1242 cm^{-1} , associada ao estiramento assimétrico da ligação $\text{C}-\text{O}$ do grupo dos ácidos carboxílicos [47]; e 723 cm^{-1} , atribuída ao estiramento da ligação $\text{C}-\text{H}$ dos anéis aromáticos [48].

Outras bandas foram localizadas em 2965 cm^{-1} , atribuída ao estiramento simétrico da ligação $\text{C}-\text{H}$; em 1409 cm^{-1} , referente às vibrações do esqueleto aromático com estiramento $\text{C}=\text{C}$; em 1342 cm^{-1} , atribuída a vibração simétrica fora do plano do $-\text{CH}_2$ [48]; em 1018 cm^{-1} , atribuída à deformação angular do grupamento CH_2 e indicativo de grupos substituintes em anel aromático nas posições 1 e 4 [25]; e em 975 cm^{-1} e 872 cm^{-1} , atribuídas a deformações simétricas fora do plano nos anéis aromáticos 1,2,4,5; tetras substituídos [49].

As bandas presentes no espectro correspondem às bandas de absorção do poli (tereftalato de etileno) PET, relatadas na literatura [25,47-49].

O termograma obtido através de análise termogravimétrica (TGA/DTG) de amostras do resíduo de poliéster (não apresentado) demonstrou que a degradação do resíduo ocorre em etapa única. A Tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros obtidos do termograma.

Tabela 2: Resultados obtidos por Análise Termogravimétrica (TGA/DTG) dos resíduos de poliéster.

$T_{onset}^{(A)}$	$T_{max}^{(B)}$	PERDA DE MASSA	MASSA INERTE
414 °C	434 °C	84%	16%

^(A) Temperatura de início de degradação; ^(B) Temperatura onde ocorre a máxima velocidade de degradação.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, a temperatura de início da degradação dos resíduos de poliéster, T_{onset} , é de 414 °C; e a temperatura onde ocorre a máxima velocidade de degradação, T_{max} , é de 434 °C. Na faixa de temperatura testada há uma perda de massa de 84%.

Esses valores são próximos aos reportados por ARIMETÉIA JÚNIOR [49] para flocos de PET reciclado provenientes de garrafas de yogurt; e aos reportados por MIRANDA [25] para filamentos constituintes de cabos de amarração de poliéster, que ficaram submersos por 3,5 e 7 anos. Esses resultados indicam que o resíduo avaliado é constituído por poli(tereftalato de etileno).

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos através da calorimetria exploratória diferencial (DSC) dos resíduos de poliéster. Os valores obtidos para as transições térmicas dos resíduos de poliéster estão muito próximos dos valores obtidos por MANCINI e ZANIN [31] para grânulos de resina PET, grau garrafa, dos reportados por SANTOS [50] para flocos de PET reciclados oriundos de garrafas de refrigerante e por MIRANDA [25] para filamentos constituintes de cabos de ancoragem de poliéster.

Tabela 3: Resultados obtidos por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) dos resíduos de poliéster.

$T_g^{(A)}$	$T_m^{(B)}$	$T_c^{(C)}$	$\Delta H_f^{(D)}$	$\chi_c^{(E)}$
76 °C	253 °C	183 °C	41J/g	30%

^(A) Temperatura de transição vítrea; ^(B) Temperatura de fusão; ^(C) Temperatura final de cristalização; ^(D) Entalpia de fusão; ^(E) Grau de cristalinidade

Os resultados obtidos na caracterização dos resíduos de poliéster provenientes de cabos de plataforma confirmam que os resíduos são constituídos de poli(tereftalato de etileno), PET.

3.2 Determinação do traço padrão

Na Tabela 4 são apresentados os valores do abatimento de tronco e da resistência à compressão axial das formulações de concreto testadas para determinação do traço padrão.

Tabela 4: Abatimento de tronco e resistência à compressão axial dos traços testados para determinação do traço padrão.

AMOSTRA	MATERIAIS (Proporção em massa)				ABATIMENTO (mm)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)
	Cimento	Areia	Brita	Água		
TR1	1	2,3	2,7	0,62	Total	11,93 ± 1,27
TR2	1	2,3	2,7	0,55	28	13,23 ± 0,95
TR3	1	2,3	2,7	0,50	0	-----

Os resultados apresentados na Tabela 4 para o abatimento do tronco, mostram o efeito do teor de água na consistência dos concretos preparados. No concreto formulado com maior proporção de água, TR1, o abatimento foi total. O concreto com a menor proporção de água, TR3, não sofreu abatimento nenhum. Os resultados mostram também que não foi possível determinar a resistência à compressão do concreto TR3, de acordo com os critérios estabelecidos na NBR 9779. Considerando os valores dos desvios padrão das medidas, os traços TR1 e TR2 dão origem a concretos com a mesma resistência.

Levando em conta essas observações, o traço TR2 foi escolhido como o traço padrão para a preparação de concretos com substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de PET.

3.3 Resistência à compressão axial dos concretos com substituição do agregado miúdo por PET

Os concretos produzidos foram identificados com os códigos: 00-PET -referente ao concreto de referência de traço TR2; 05-PET e 10-PET-referentes aos concretos com substituição parcial do agregado miúdo por 5 e 10% em volume de PET, respectivamente.

A Tabela 5 apresenta os valores da resistência à compressão dos concretos produzidos, determinados nas idades de 7, 14, 28 e 150 dias.

Tabela 5: Resistência à compressão axial dos concretos produzidos.

IDADE	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPA)		
	00-PET	05-PET	10-PET
7 dias	14,18 ± 1,08	19,37 ± 0,94	12,31 ± 0,52
14 dias	19,12 ± 0,60	23,74 ± 1,16	15,27 ± 0,85
28 dias	25,70 ± 1,50	29,00 ± 2,40	18,50 ± 0,70
150 dias	29,41 ± 1,83	32,78 ± 1,94	21,83 ± 1,77

O concreto 05-PET, apresentou valores de resistência significativamente maiores do que os do concreto de referência, até os 14 dias. Aos 28 e 150 dias, considerando os desvios, apresentou uma tendência à obtenção de valores de resistência maiores do que os de referência. O concreto 10-PET apresentou o pior desempenho em todas as idades.

De acordo com RAHMANI *et al.* [8], a maior resistência à compressão para baixos teores de substituição é decorrente da flexibilidade e forma das partículas de PET. Esses dois fatores geram maior probabilidade de ocorrência de intertravamento das partículas de PET nas superfícies fraturadas na medida em que a carga se incrementa. Enquanto que para maiores teores de substituição devido à fraca coesão entre a superfície da massa e as partículas de PET, as cargas atuam como barreira inibindo a adesão da pasta com os agregados.

A redução da resistência à compressão com a inserção de fibras no concreto é evidência da degradação da fibra de PET no ambiente alcalino do cimento e está relacionada com a geometria da fibra e com o grau de dispersão e aderência da fibra na matriz cimentícia [18].

Na Fig. 5 é mostrado o percentual de resistência à compressão que atinge cada concreto em cada idade com relação à resistência aos 28 dias.

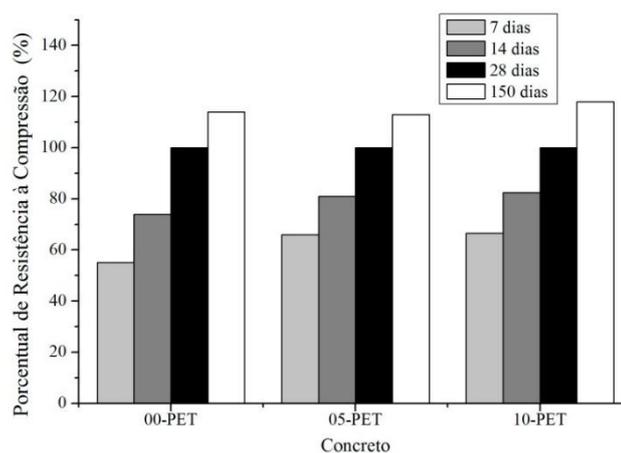


Figura 5: Percentual de resistência à compressão em relação à resistência aos 28 dias para cada concreto avaliado.

Na Fig. 5 se observa que resistência à compressão axial de todos os concretos aumenta com o tempo. O concreto 00-PET atinge em 7 dias, 55% da resistência à compressão axial em relação à sua resistência em 28 dias; em 14 dias atinge 74% e em 150 dias 114%. Já os concretos 05-PET e 10-PET atingem em 7 dias, 66% e 66,5%, respectivamente; 81% e 82,5% em 14 dias e 113% e 118% em 150 dias. Esse aumento é decorrente da hidratação do cimento, que ocorre após a sua mistura com a água. A reação de hidratação é responsável pela aderência desses materiais e pela resistência adquirida.

PELLISSER *et al.* [18] observaram um leve aumento da resistência à compressão em amostras de concreto de cimento CPV-ARI contendo diferentes teores de fibras PET (0,05%; 0,18% e 0,30%) e ensaiados na idade de 150 dias em relação aos valores apresentados pelas amostras com idade de 28 dias. Segundo os autores, esses resultados mostram que a resistência fornecida pelo cimento é superior à perda de resistência gerada da degradação da fibra. Esses resultados corroboram o efeito mínimo de baixos teores de fibras PET na resistência à compressão do concreto, como observado na amostra contendo 5% de resíduos de PET.

Os resultados obtidos indicam que a substituição parcial de 5% do agregado miúdo por partículas de resíduos de PET, provenientes de cabos de linhas de amarração de plataformas petrolíferas, tende a melhorar o desempenho do concreto de referência utilizado neste trabalho. Outros ensaios devem ser efetuados de forma a se verificar se a incorporação de PET promove o aumento da tenacidade.

O concreto de referência e o concreto com teor de substituição de 5% do agregado miúdo por resíduos de PET apresentam resistências compatíveis com aplicações em concreto estrutural simples, como em pequenas estruturas ou residências em que as estruturas sejam revestidas e em aplicações em que baixas deformações são requeridas. Já o concreto com 10% de substituição pode ser empregado em aplicações não estruturais.

3.4. Absorção de água

Todos os concretos apresentaram valores de absorção de água aceitáveis. Segundo NEVILLE [51], os concretos de boa qualidade apresentam níveis de absorção bem inferior a 10%. Os valores médios da absorção de água obtidos foram: 7,2% para o concreto de referência; 6,3% para o concreto com 5% de substituição do agregado miúdo; e 8,1% para o concreto com 10% de substituição.

A Fig. 6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de absorção de água dos concretos preparados.

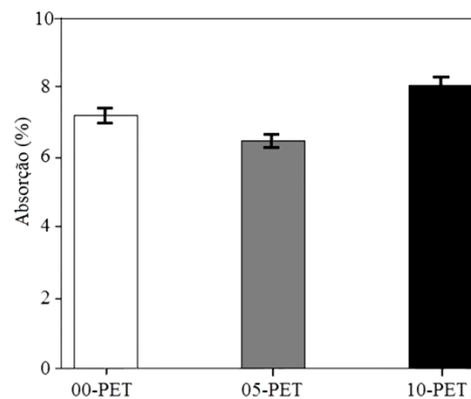


Figura 6: Absorção de água dos concretos em função do teor de substituição de agregados miúdos por resíduos de PET.

SAIKA e BRITO [52] observaram em corpos de prova de concretos com idade de 28 dias, que teores de substituição de agregado por 5%, 10% e 15% de PET reciclado na forma de pellets (tamanho de partícula entre 4 e 0,5 mm) não influenciam significativamente a capacidade de absorção de água nos concretos produzidos. Os autores reportaram que a inserção de até 10% de PET reciclado promove uma leve redução da capacidade de absorção de água do concreto, enquanto a inserção de 15% de PET reciclado promove leve aumento da capacidade de absorção de água.

O aumento na absorção de água com o aumento do teor de substituição tem sido observado por SILVA *et al.* [53] quando utilizaram resíduos de PET micronizado substituindo parcialmente o agregado miúdo na formulação de uma argamassa. Esse aumento foi atribuído ao caráter higroscópico do polímero somado à fraca interação química entre a matriz cimentícia, gerando uma porosidade residual que incrementa a absorção de água. De acordo com os resultados obtidos, esse efeito é evidente para o concreto com maior teor de substituição do agregado miúdo por resíduos de PET.

Os resultados obtidos para a capacidade de absorção de água dos concretos estão em concordância com os valores de resistência à compressão axial obtida para os concretos produzidos. Em geral, um aumento na capacidade de absorção de água, implica uma redução da resistência à compressão e um aumento na porosidade [52,54]. A maior absorção de água obtida para o concreto 10-PET pode ser atribuído a um aumento na porosidade do material.

Há alguns estudos que não mostram uma relação explícita entre a absorção de água e a resistência à compressão. É inegável, entretanto, a existência de interação entre esses dois fatores, uma vez que os poros na superfície afetam a ligação entre o agregado e a pasta de cimento, e conseqüentemente afetam a resistência do

concreto [55].

3.5 Porosidade dos concretos

A Tabela 6 apresenta os valores da porosidade média dos concretos obtidos através da análise das imagens da seção transversal dos corpos de prova dos concretos produzidos e os respectivos valores da resistência à compressão axial apresentados na Tabela 5.

Tabela 6: Porosidade (%) determinada a partir de imagens de amostras de concreto com idade de 28 dias e os respectivos valores da resistência à compressão axial.

AMOSTRA	POROSIDADE MÉDIA (%)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)
00-PET	4,17 ± 0,59	25,70 ± 1,50
05-PET	3,94 ± 0,25	29,00 ± 2,40
10-PET	2,58 ± 0,67	18,50 ± 0,70

O resultado para o concreto com substituição de 5% de agregado miúdo por resíduos de PET é condizente com o resultado obtido para a resistência à compressão, cujo valor aos 28 dias é levemente maior que a do concreto de referência. O valor obtido para a porosidade do concreto com substituição de 10% não era esperado considerando que a resistência à compressão axial do concreto 10-PET foi menor do que a resistência da amostra de referência, 00-PET.

Diversos fatores podem ter contribuído com o resultado anômalo, desde o preparo da massa até o processamento das imagens. No processamento das imagens, a escolha da intensidade de contraste e do limiar da binarização são fatores que influenciam de forma significativa na medida da porosidade. Como dependem da intervenção do usuário, esses fatores são susceptíveis de gerar erros, como por exemplo, a eliminação de poros que são confundidos com ruído ou a contabilização de ruídos como poros [31].

Concretos de cimento Portland contendo resíduos poliméricos em substituição a agregados minerais podem apresentar diferentes valores de porosidade, dependendo principalmente do teor e do formato do resíduo utilizado na substituição dos agregados minerais. MODRO *et al.* [20] observaram que a porosidade, (calculada a partir dos valores da densidade real e a densidade aparente) aumenta na medida em que o percentual de substituição é aumentado. O aumento na área superficial dos resíduos de PET produz o mesmo efeito. Outro fator mencionado é o abatimento, cujo valor diminui com o acréscimo de resíduo, o que poderia promover a maior incorporação de ar no concreto.

A Tabela 7 mostra as equações obtidas segundo os modelos de Hasselman, Power, Ryshkevitch e Schiller para os concretos avaliados. Dada a inconsistência dos resultados obtidos para o concreto 10-PET, os dados referentes a essa amostra foram desconsiderados para aplicação desses modelos.

Tabela 7: Equações das curvas resistência *versus* porosidade obtidas para o concreto de referência (00-PET) e o concreto com substituição de 5% de agregado miúdo (05-PET) segundo os modelos de Hasselmann, Powers, Ryshkevitch e Schiller.

CONCRETO	HASSELMANN	POWERS	RYSHKEVITCH	SCHILLER
00-PET	$\sigma_0 = 29,37(1 - 3p)$	$f_c = 29,20(1 - p)^3$	$s = 29,12e^{-3p}$	$f_c = 8,19 \ln(0,96/p)$
05-PET	$\sigma_0 = 32,89(1 - 3p)$	$f_c = 32,72(1 - p)^3$	$s = 32,64e^{-3p}$	$f_c = 9,09 \ln(0,96/p)$

A Fig. 7 mostra as curvas de resistência *versus* porosidade, obtidas a partir dessas equações.

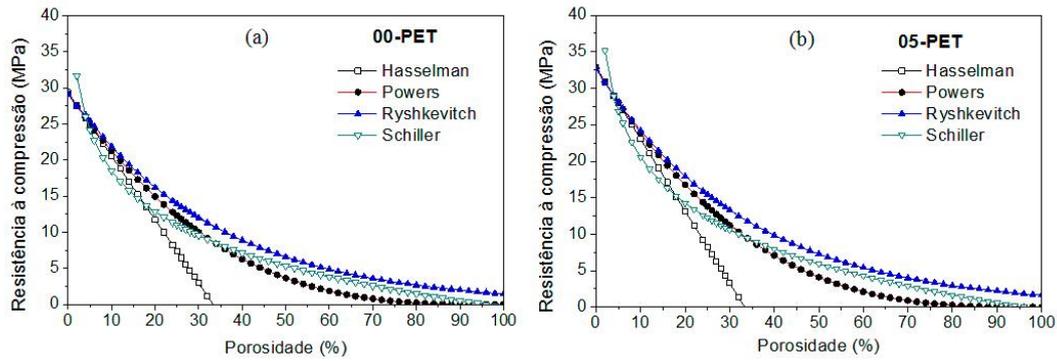


Figura 7: Curvas de resistência *versus* porosidade obtidas segundo os modelos de Hasselmann, Powers, Ryshkevitch e Schiller (a) para o concreto de referência; e (b) para o concreto com percentual de substituição de 5%.

As curvas mostram a existência de uma relação inversa entre a porosidade e a resistência à compressão dos concretos avaliados. As curvas tendem a apresentar valores bastante semelhantes para baixas percentagens de porosidade, como observado por PESSOA *et al.* [34]. Para os concretos avaliados, o perfil das curvas de Powers e Ryshkevitch são as que apresentam maior similaridade na faixa de porosidade aceitável para os concretos (valores menores do que 20%) [33]. A metodologia utilizada para determinação da porosidade das amostras de concreto tem-se mostrado eficiente para os concretos avaliados.

3.6 Distribuição dos poros em função da área, excentricidade e orientação.

A distribuição de vazios em função da área apresentada na Tabela 8 mostra que mais de 90% dos vazios contabilizados foram vazios de ar: 92,6% no concreto de referência; e 99,8% e 99,9% nos concretos com percentual de substituição de 5% e 10% de PET, respectivamente.

Tabela 8: Distribuição dos poros por faixa de área (maior ou menor de $7,07 \times 10^4$ pixels) nos concretos estudados.

CONCRETO	VAZIOS COM ÁREAS MENOR OU IGUAL A $7,07 \times 10^4$ PIXELS	VAZIOS COM ÁREAS MAIORES DE $7,07 \times 10^4$ PIXELS	TOTAL DE POROS
00-PET	17750	73	17823
05-PET	15564	40	15604
10-PET	21342	25	21367

A Fig. 8 apresenta as curvas de distribuição de poros em função da sua excentricidade e do seu ângulo de orientação para o concreto de referência. Curvas similares foram obtidas para os concretos contendo resíduos de PET, pelo que foi considerado não ser necessária sua apresentação.

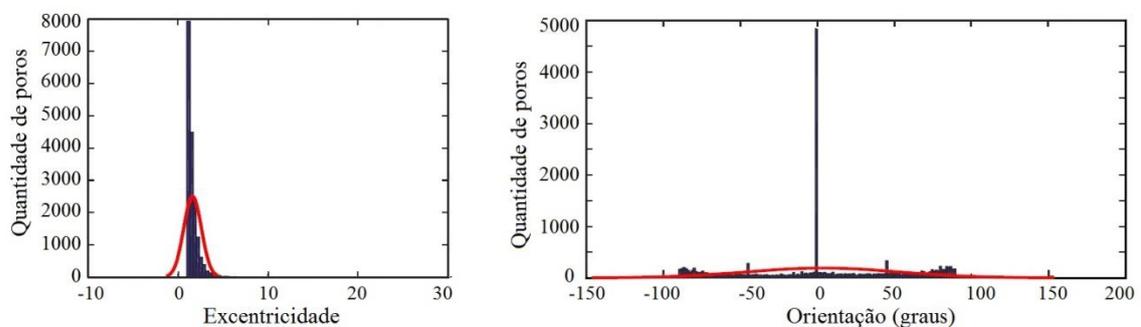


Figura 8: Distribuição dos poros (a) em relação à sua excentricidade; e (b) em relação à sua orientação preferencial.

A curva de distribuição de poros em relação à excentricidade no concreto de referência, Fig. 8(a), mostra que a maior parte dos poros contabilizados apresentam baixos valores de excentricidade, menor ou igual a 1.

A curva de distribuição de poros em relação à orientação preferencial, Fig. 8(b), mostra que a maior parte dos poros contabilizados apresenta ângulo de orientação de valores bastante baixos, muito próximos de zero. Valores característicos para os vazios de ar que são de geometria esférica ou quase esférica [28]. Verifica-se de esse modo que mais de 90% de poros contabilizados nas imagens são vazios de ar.

Esse resultado mostra que a metodologia permite reduzir a possibilidade de contabilizar riscos como poros verdadeiros, tais como riscos produzidos pelo descolamento dos agregados dos resíduos de PET por causa da fraca interação interfacial entre eles.

4. CONCLUSÕES

Nesse trabalho, concretos de cimento Portland formulados com substituição parcial do agregado miúdo por diferente teores de resíduos, provenientes de cabos de amarração de plataformas marítimas de petróleo, foram produzidos. Estudos de caracterização demonstraram que esses resíduos são basicamente constituídos de poli (tereftalato de etileno) (PET).

Os concretos de referência e o produzido com teor de substituição do agregado miúdo por 5% de PET, apresentaram valores de resistência à compressão que possibilitam sua aplicação na construção civil, em aplicações estruturais simples. O concreto com teor de substituição do agregado miúdo por 10% de PET, apesar de apresentar valores de resistência à compressão menores que os apresentados pelo concreto de referência, pode ser empregado em aplicações não estruturais. A redução da resistência à compressão está relacionada com a degradação do PET e a fraca interação entre o resíduo e a matriz.

A capacidade de absorção de água dos concretos, como esperado, apresenta relação inversa com a resistência à compressão, e valores menores que 10% na idade de 150 dias. Essa propriedade é intrinsecamente relacionada com a estrutura porosa do concreto, e os resultados obtidos indicaram que quanto maior for o teor de resíduo, maior será a geração de vazios no concreto. A flexibilidade característica do PET pode contribuir para a formação de vazios a medida que o teor de PET no concreto aumenta.

O algoritmo desenvolvido para análise dos poros mostrou ser eficiente para captura de vazios presentes na estrutura dos concretos e na identificação dos poros do tipo vazios de ar, através da determinação das características geométricas desses elementos, sendo superior a versão anterior do algoritmo que possibilitava somente a determinação da porosidade. Na versão atual, a possibilidade de se considerar riscos como poros verdadeiros é bastante reduzida, o que garante maior precisão na determinação da porosidade e a possibilidade de se obter a distribuição de tamanhos de poro presentes na estrutura dos concretos. Futuramente será possível melhorar o algoritmo de forma a aplicá-lo no estudo da estrutura interna do concreto, em conjunto com outras técnicas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento e Pessoal do Ensino Superior (CAPES) e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro e agradecem ao M.B.B. Enterprises, Inc., Advanced Industrial Fiber Technology pela doação dos resíduos de PET.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, *NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento*, 3ª ed., 2015.
- [2] TUTIKIAN, B.F., HELENE, P., “Dosagem dos Concretos de Cimento Portland”, In: Geraldo Cechella Isaia (ed.), *Concreto: Ciência e Tecnologia*, 1ª ed., capítulo 12, São Paulo, SP, Brasil, IBRACON, 2011.
- [3] KIM, S.B., YI, N.H., KIM, H.Y., *et al.*, “Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete”, *Cement and Concrete Composites*, v. 32, n. 3, pp. 232-240, Jan. 2010.
- [4] RODRIGUES, N.C.S., CARVALHO, M.M.B., BALBINO, A.V.M., *et al.*, “Fibra de PET na produção de concretos”, *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 15, n. 3, pp. 207-211, jul./set. 2018.
- [5] OLIVEIRA V.C.H.C., DAMINELI B.L., AGOPYAN, V., *et al.*, “Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos”, *Ambiente construído*, v. 14, n. 4, Out./Dec. 2014.
- [6] GOMES, C.A., POGGIALI, F.S.J., AZEVEDO, R.C., “Concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição e adições minerais: Uma análise bibliográfica”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 2, e-12358, Jun. 2019.

- [7] FIGUEIREDO, A. L., ALVES, A.P.M., FERNANDES JUNIOR, V.J., *et al.*, “Reciclagem terciária do poli (etileno tereftalato) visando a obtenção de produtos químicos e combustível: Uma revisão”, *Revista Virtual de Química*, v. 7, n. 4, pp. 1145-1162, Jan. 2015.
- [8] RAHMANI, E., DEHESTANI, M., BEYGI, M.H.A., *et al.*, “On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles”, *Construction and Building Materials*, v. 47, pp. 1302-1308, Jul. 2013.
- [9] KHALOO, A.R., ESRAFILI, A., KALANI, M., *et al.*, “Use of polymer fibres recovered from waste car timing belts in high performance concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 80, pp. 31–37, Apr. 2015.
- [10] YANG, S., YUE, X., LIU, X., *et al.*, “Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles”, *Construction and Building Materials*, v. 84, pp. 444-453, Mar. 2015.
- [11] SILVA, D.A., BETIOLI, A.M., GLEIZE, P.J.P., *et al.*, “Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials”, *Cement and Concrete Research*, v. 35, pp. 1741-1746, Set. 2005.
- [12] MEDEIROS, A., “Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras”, Tese de DSc., Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- [13] DIAS, D. M., CALMON, J. L., VIEIRA, G. L., “Concreto reforçado com fibras poliméricas exposto ao fogo”, *Revista ALCONPAT*, v. 10, n. 1, pp. 36 – 52, Dez. 2019.
- [14] AMARAL, J.C., SILVA, L.C.F., MORAVIA, W.G., “Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 22, n. 1, e-11780, May. 2017.
- [15] KAKOOEI, S., AKIL, H.M.A., JAMSHIDI, M., *et al.*, “The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures”, *Construction and Building Materials*, v. 27, n. 1, pp. 73-77, Feb. 2012.
- [16] SCHETTINO, R.M., “Concreto com adição de fibras de politereftalato de etileno”, Dissertação de Mestrado Profissional, Centro Universitário UniFOA, Volta Redonda, RJ., 2015.
- [17] EHRENBRING, H.Z., TUTIKIAN, B.F., QUININO, U.C.M., “Análise comparativa da retração por secagem de concretos com fibras novas e recicladas de poliéster”, *Ambiente construído*, v. 18, n. 3, pp. 195-209, Jul./Sept. 2018.
- [18] PELISSER, A.F., MONTEDO, O.R.K., GLEIZEB, P.J.P., *et al.*, “Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete”, *Materials Research*, v. 15, n. 4, pp. 679-686, Jul. 2012.
- [19] PACHECO-TORGAL, F., DING, Y. “Concrete with polymeric wastes”. In: *Eco-Efficient Concrete*, v. 2013, *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, Woodhead Publishing, pp. 311-339, 2013.
- [20] MODRO, N.L.R., MODRO, N.R., MODRO, N.R., *et al.*, “Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 14, n. 1, pp. 725-736, 2009.
- [21] AHMAD, N.F.A., RAZALI, S.N.M., SAHAT, S., *et al.*, “PET Concrete as paver block”, *AIP Conference Proceedings*, v. 2016, n.1, 020015, Sept. 2018.
- [22] FRIGIONE, M., “Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete”, *Waste Management*, v. 30, n. 6, pp. 1101-1106, Jun. 2010.
- [23] OLIVEIRA, J.A., ALVES, A., FERNANDES, A.M., *et al.*, “Estudo da substituição parcial de pó de pedra por PET em concreto para fabricação de pisos intertravados”, In: *Anais do Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas*, v. 16, n. 16, pp. 1520-1524, Rio de Janeiro, RJ, Set. 2016.
- [24] PIRES, G.W.M.O., PASCHOALIN FILHO, J.A. “Blocos intertravados manufaturados com concreto dosado utilizando-se resíduos de PET (politereftalato de etileno): Aspectos econômicos e ambientais”, In: *Anais do Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente: Desafios da Sustentabilidade na Economia de Baixo Carbono*, artigo 108, 1-15, São Paulo, SP, Brasil, Dez. 2015. <http://engemausp.submissao.com.br/17/anais/arquivos/108.pdf>. Acesso em: 07/2020.
- [25] MIRANDA, K.L., “Caracterização de filamentos de PET, providos de cabos de ancoragem, submersos na costa brasileira”, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2014.
- [26] SUDAIAA, D.P., BASTOS, M.B., FERNANDES, E.B., *et al.*, “Sustainable recycling of mooring ropes from decommissioned offshore platforms”, *Marine Pollution Bulletin*, v. 134, pp. 357-360, Jul. 2018.
- [27] CAMPITELI, D.A., *Concrete porosity*, Boletim Técnico do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP, São Paulo, 1987.

- [28] MEHTA, P. K., MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*. 3ª ed., São Paulo, IBRACON, 2008.
- [29] ZHAO, H., XIAO, Q., HUANG, D., *et al.*, “Influence of pore structure on compressive strength of cement mortar”, *The Scientific World Journal*, v. 2014, Article ID 286939, 11 pages, Mar. 2014, DOI:10.1155/2014/247058
- [30] ASSIS, J.T., EINSFELD, R., DE CARVALHO, G., *et al.*, “Estudo da porosidade em concretos de alto desempenho por técnicas de processamento de imagens”, In: *Anais do XXXI Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*, pp. 315-319, Belém, PA, Set. 2008.
- [31] PESSÕA, J.R.C., DOMINGUÉZ, J.S., DE CARVALHO, G., *et al.*, “Porosidade do concreto determinada por microtomografia com raios X e processamento de imagem”, *Engenharia Estudo e Pesquisa*, v. 14, n. 2, pp. 20-26, Jul.-Dez. 2014.
- [32] OLIVEIRA, C.I.R., ROCHA, M.C.G., ASSIS, J.T. de, *et al.*, “Avaliação da porosidade em concretos contendo resíduos de PET por técnicas de processamento de imagen”, In: *Anais do XX Encontro Nacional de Modelagem Computacional – VIII Encontro de Ciências e Tecnologia de Materiais*, pp. 1443-1451, Nova Friburgo, RJ, Out. 2017.
- [33] DE SOUZA, I.D., “Metodologia para análise dos poros de corpos de concreto por processamento de imagens digitais”, TCC, Engenharia Mecânica, Instituto Politécnico/UERJ, Nova Friburgo, RJ, 2018.
- [34] PESSÕA, J.R., DOMINGUÉZ, J.S., DE CARVALHO, G., *et al.*, “Resistência à compressão do concreto por imagens microtomográficas”, *Engenharia Estudo e Pesquisa*, v. 15, n. 2, pp. 29-34, Jul.-Dez. 2015.
- [35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, *NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial*, Rio de Janeiro, RJ, 1991.
- [36] MANCINI, S.D., ZANIN, M., “Recyclability of PET from virgin resin”, *Materials Research*, v. 2, n. 1, pp. 33-38, Jan. 1999.
- [37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, *NBR 5738: Moldagem e cura dos corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto*, Rio de Janeiro, 2003.
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, *NBR NM67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 1988
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, *NBR 5739: Concreto: Ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos*, Rio de Janeiro, 2007.
- [40] MARANGON, E., “Aspectos do comportamento e da degradação de matrizes de concreto de cimento Portland reforçado com fibras provenientes de reciclagem de garrafas PET”, TCC, Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2004.
- [41] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*, Rio de Janeiro, 2005.
- [42] CHANG, J.-D., YU, S.-S., CHEN, H.-H., *et al.*, “HSV-based color texture image classification using wavelet transform and motif patterns”, *Journal of Computers*, v. 20, n. 14, pp. 63-69, Jan. 2010.
- [43] AUGUSTO, K.S., “Identificação automática do grau de maturação de pelotas”, Dissertação de M.Sc., Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 2012.
- [44] MARQUES FILHO, O., NETO, H.V., *Processamento digital de imagens*, 1ª ed., Rio de Janeiro, Brasport, 1999.
- [45] SOUZA, K.P., PISTORI, H., “Implementação de um extrator de características baseado em momentos da imagem”. In: *XVIII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing - SIBGRAPI, III Workshop de Trabalhos de Iniciação Científica em Computação Gráfica e Processamento de Imagens - WICCGPI*, Natal, Outubro 9-12, 2005. Disponível em: http://www.gpec.ucdb.br/pistori/publicacoes/kleber_sibgrapi2005.pdf. Acesso em: 07/2020.
- [46] QUARCIONI, V.A., CHOTOLI, F.F., ÂNGULO, S.C., *et al.*, “Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes”, *Ambiente Construído*, v. 9, n. 4, pp. 175-187, Out./Dez. 2009.
- [47] MECOZZI, M., NISINI, L., “The differentiation of biodegradable and non-biodegradable polyethylene terephthalate (PET) samples by FTIR spectroscopy: A potential support for the structural differentiation of PET in environmental analysis”, *Infrared Physics & Technology*, v. 101, pp. 119-126, Sept. 2019.
- [48] SILVERSTEIN, R., BASSLER, C., MORRIEL, T., *Identificação espectrométrica de compostos orgânicos*, 3ª ed., Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1979.



- [49] ARIMATÉIA JÚNIOR, H., “Pirólise de misturas plásticas”, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.
- [50] DOS SANTOS, A.P., “Compósito à base de poli (tereftalato de etileno) e resíduo concretício visando aplicação na construção civil”, Dissertação de M.Sc, Instituto Militar de Engenharia, IME, Rio de Janeiro, RJ, 2017.
- [51] NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 2ª ed., São Paulo, PINI, 1997.
- [52] SAIKIA, N.; DE BRITO, J., “Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete”, *Materials Research*, v.16, n. 2, pp. 341-350, 2013.
- [53] SILVA, R.O., NUNES, C.G.L., GUERRA, T.D., *et al.*, “Avaliação da absorção de água e índice de vazios de argamassas incorporadas com politereftalato de etileno”. In: Anais do III Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências, Trabalho_EV107_, pp. 1-9, Campina Grande, PB, Jun. 2018. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/index.php/artigo/visualizar/42962>. Acesso: 30/05/2020.
- [54] MEDEIROS-JUNIOR, R.A., MUNHOZ, G.S., DE MEDEIROS, M.H.F., “Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolan”, *Revista ALCONPAT*, v. 9, n. 2, pp. 152-166, 2019.
- [55] ALSAYED, S.H., AMJAD, M.A., “Strenght, water absorption on porosity of concrete incorporating natural and crushed aggregate”, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, v. 8, n. 1, pp. 109-119, 1996.

ORCID

Carlos Ivan Ribeiro de Oliveira	https://orcid.org/0000-0003-0325-3874
Nancy Isabel Alvarez Acevedo	https://orcid.org/0000-0002-0475-3240
Marisa Cristina Guimarães Rocha	https://orcid.org/0000-0002-5155-3399
Icaro Delgado de Souza	https://orcid.org/0000-0003-3894-2215
Victor Manuel Tamé Reyes	https://orcid.org/0000-0002-2068-7853
Joaquim Teixeira de Assis	https://orcid.org/0000-0002-4027-6939