



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
TECNÓLOGO EM CONSTRUÇÃO CIVIL - EDIFICAÇÕES**

HYGOR ALVES MEIRELES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM
CONCRETO NÃO ESTRUTURAL UTILIZANDO AGREGADO DE PET
EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO**

CABO DE SANTO AGOSTINHO

2019

HYGOR ALVES MEIRELES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM
CONCRETO NÃO ESTRUTURAL UTILIZANDO AGREGADO DE PET
EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO**

**Trabalho de conclusão de Curso (TCC) apresentado
à Universidade Federal Rural de Pernambuco como
requisito parcial para obtenção do grau de
Tecnólogo em Construção Civil - Edificações.**

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Simone Perruci Galvão.

CABO DE SANTO AGOSTINHO

2019

HYGOR ALVES MEIRELES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM
CONCRETO NÃO ESTRUTURAL UTILIZANDO AGREGADO DE PET
EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO**

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal Rural de Pernambuco como requisito para obtenção do grau de Tecnólogo em Construção Civil - Edificações.

Data de aprovação: 01 / 02 / 2019.

Banca examinadora

Prof.^a Dr.^a Simone Perruci Galvão, UACSA, UFRPE

Orientadora

Prof.^a Dr.^a Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo, UACSA, UFRPE

Examinadora

Prof. Dr. Robson José Silva, UACSA, UFRPE

Examinador

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Esmeraldina Pereira da Silva, Cabo de Santo Agostinho-PE, Brasil

M514a Meireles, Hygor Alves

Avaliação das propriedades mecânicas de um concreto não estrutural utilizando agregado de PET em substituição ao agregado miúdo / Hygor Alves Meireles. – 2019.

50 f.: il.

Orientadora: Simone Perruci Galvão.

Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Construção Civil - Edificações) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Cabo de Santo Agostinho, BR- PE, 2019.

Inclui referências e apêndice (s).

1. Concreto 2. Substituição de areia 3. PET 4. Propriedades no estado fresco. 4. Propriedades mecânicas I. Galvão, Simone Perruci, orient. II. Título

CDD 624

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir almejar e realizar este desafio;

À Prof.^a Simone Perruci Galvão, pela orientação, apoio e confiança prestados ao longo deste trabalho;

À minha família e amigos, pelos conselhos, encorajamento e compreensão, em especial, à minha amada companheira Gabriela Soares Rosa, por esta longa trajetória de 6 anos que nos levou até o atual momento;

A Ezequiel e Alisson, técnicos dos laboratórios de construção civil das instituições UFPE e IFPE, pela colaboração na realização de ensaios;

A Glauber Costa, do Departamento de Meio Ambiente, Segurança e Qualidade da empresa SulPET Plásticos, pelo apoio na aquisição de materiais.

RESUMO

O concreto é um material utilizado em larga escala no mundo e, por consumir os recursos naturais provenientes dos materiais que o compõem - cimento, areia, brita e água - na mesma intensidade, constitui uma ameaça ambiental, exigindo que se estudem formas de torná-lo eficiente e econômico. Por outro lado, o polietileno tereftalato (PET) representa um problema para a sociedade por ser, em grande parte, descartado inadequadamente no meio ambiente e provocar várias consequências, entre estas, o entupimento de sistemas de esgotamento sanitário. Essa pesquisa buscou contribuir para a minimização de ambas as problemáticas por meio da análise de um concreto composto com PET. Neste estudo foi realizada análise da consistência, no estado fresco, e dos aspectos resistência à compressão, absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, no estado endurecido, de um concreto padrão, projetado para resistir a 20 MPa na compressão, e de outros dois, com substituição volumétrica da areia por flocos de PET, nas proporções de 5% e 10%. A partir dos resultados apresentados, pôde-se concluir que a substituição parcial de areia por PET proporcionou, de maneira geral, ao concreto: aumento do abatimento no tronco de cone, variação pouco significativa de resistência à compressão, redução da absorção de água e do índice de vazios, assim como diminuição da massa específica do concreto. Para os teores de substituição e os parâmetros estudados, o procedimento demonstra ter potencialidade para aplicação em concretos não estruturais.

Palavras-chave: Concreto. Substituição de Areia. PET. Propriedades no Estado Fresco. Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

Concrete is used in large-scale worldwide and, because of its elevated consumption of natural resources, such as cement, sand, gravel and water, constitutes an environmental threat, which demands production of studies approaching ways to render it more efficient and cost-effective. Alternatively, the polyethylene terephthalate (PET) represents a problem to society, since it is discarded improperly in environment most of times, which may result in consequences such as the clogging of sanitary sewage systems, among others. This study searched for a manner to minimize both problems by evaluating concrete with PET in its composition. This research assessed a standard concrete, dosed to reach a compressive strength of 20 MPa, with respect to consistency, in its fresh state, as well as compressive strength, water absorption, void ratio and specific mass, in its hardened state. Results were compared with concretes which had part of its sand volume (5% and 10%) replaced by the same volume of PET flakes. In general, the experiment's outcome showed that partial replacement of natural sand by PET flakes provided concrete: decrease in consistency; not very significant variation in resistance to axial compression; reduction in water absorption and void ratio; as well as decline in specific mass. For contents of replacement evaluated and parameters studied, sand replacement by PET flakes procedure has showed potential to be applied in non-structural concretes.

Keywords: Concrete. Sand Replacement. PET. Fresh State Properties. Mechanical Properties.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	8
1.1	Justificativa do tema	9
1.2	Objetivos.....	10
1.2.1	Objetivo geral	10
1.2.2	Objetivos específicos.....	10
1.3	Delimitações do trabalho.....	10
2.	O CONCRETO	11
2.1	Agregados no concreto	11
2.2	PET e sua aplicação no concreto.....	13
2.2.1	PET e suas propriedades.....	15
2.2.2	Concreto com agregado de PET	16
2.3	Propriedades nos estados fresco e endurecido dos concretos com agregado de PET..	17
3.	METODOLOGIA	21
3.1	Caracterização dos materiais componentes do concreto	21
3.1.1	Cimento	21
3.1.2	Água	21
3.1.3	Agregado miúdo convencional	22
3.1.4	Agregado de PET	22
3.1.5	Agregado graúdo.....	23
3.2	Dosagem do concreto.....	24
3.3	Concretagem.....	24
3.4	Moldagem e cura dos corpos de prova de concreto	25
3.5	Avaliação de propriedade do concreto no estado fresco	26
3.6	Avaliação das propriedades do concreto no estado endurecido	26
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1	Aspecto do concreto no estado fresco	28
4.2	Aspectos do concreto no estado endurecido	31
5.	CONCLUSÕES	36
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
	APÊNDICE A: CÁLCULOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMPONENTES DO CONCRETO	42

APÊNDICE B: CÁLCULOS DE DEFINIÇÃO DO TRAÇO DO CONCRETO (MÉTODO ABCP).....	46
APÊNDICE C: CÁLCULOS DE TRAÇOS DE CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO EM VOLUME DO PET.....	49
APÊNDICE D: CÁLCULOS PARA OBTENÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA (NBR 9778).....	50

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), concreto é um material composto por um meio contínuo aglomerante (formado pela mistura de cimento e água, no caso concretos de cimento hidráulico), com fragmentos de agregado inseridos. Segundo os mesmos autores, cimento hidráulico é aquele cujos produtos de hidratação - que dão origem às propriedades aglomerantes - são estáveis em meio aquoso, enquanto os agregados são elementos granulares que podem ser divididos em grãos (maiores que 4,8 mm) e miúdos (menores que 4,8 mm e maiores que 0,075 mm).

Ao serem misturados em proporções adequadas, os componentes do concreto resultam em um produto plástico que permite operações de manuseio, adquire coesão e resistência, sendo estas características provenientes do desenvolvimento das reações de hidratação no aglomerante. Estas propriedades fazem o uso do concreto ser tão difundido mundialmente.

Já no século 20 a significância do concreto para o mercado construtivo e para a economia era relatada. Segundo S. Brunauer e L. E. Copeland (1964), citados por Mehta e Monteiro (1994, p. 1), o consumo de concreto em 1963 “foi estimado em três bilhões de toneladas, ou seja, uma tonelada por ser humano vivo. O homem não consome nenhum outro material em tal quantidade, a não ser a água”.

O concreto, que pode ser classificado como um compósito por ser composto por mais de uma fase com propriedades físicas/químicas diferentes, continua com tendência crescente de consumo nos dias atuais, sendo a indústria da construção civil considerada pelo Conselho Internacional de Construção o setor de atividades humanas com maior consumo de recursos naturais (GOVERNO DO BRASIL, 2014).

De acordo com Isaia (2011), um dos maiores motivos de o concreto ser amplamente empregado é a facilidade em encontrar a matéria-prima responsável pela fabricação do cimento - calcário e argila - em diversos locais do planeta. Em adição a este fator, vantagens inerentes ao material, tais como versatilidade, durabilidade e desempenho, tornam-no atrativo por proporcionarem vida útil adequada às construções e possuírem custo competitivo com outros materiais estruturais.

Aliada ao incessante aumento no consumo de concreto, está a busca por técnicas e materiais que o tornem mais eficiente e econômico, assim como a procura por procedimentos que minimizem o uso de matéria-prima. Neste contexto, o uso de materiais descartados no meio ambiente que possam agregar propriedades ao concreto, de forma a reduzir o consumo de

clínquer ou até mesmo dos agregados, torna-se cada dia mais viável, uma vez que este é um dos materiais de construção mais amplamente utilizados no Brasil e no mundo.

Assim sendo, pelo fato de o concreto ser composto basicamente de materiais não renováveis e de alta perturbação ambiental ao serem extraídos e produzidos, iniciou-se uma busca constante por maneiras de minorar tais efeitos negativos, assim como por novos materiais a serem aplicados no setor construtivo, entre os quais se pode citar o polietileno tereftalato (PET).

Segundo o jornal Estadão (2016), o Brasil tem uma produção de resíduos sólidos por habitante por ano semelhante à de países desenvolvidos, mas ainda não tem um padrão de descarte equivalente a estes. Entre os resíduos sólidos gerados, um dos principais componentes são as garrafas PET, cujo descarte - normalmente feito de maneira inadequada - acarreta problemas sociais e ambientais, como o entupimento de sistemas de esgotamento sanitário, redução da capacidade de armazenamento de aterros, poluição de rios e lagos e modificação das propriedades de absorção superficial do solo, tornando-o estanque.

De acordo com Guerra, Rocha e Okabayashi (2017), uma forma de mitigar as problemáticas geradas pela elevada produção de concreto e polietileno tereftalato (PET) é aplicar o polímero no setor construtivo, o que poderia diminuir tanto os impactos ambientais gerados pelo setor da construção quanto de outras indústrias, como a de produção de plásticos. Logo, a fim de avaliar as potencialidades do material polimérico para uso na produção de concretos não estruturais, foi concretizado este estudo, onde se analisou a substituição, em volume, de diferentes porcentagens da areia natural presente no concreto por agregado de PET.

1.1 Justificativa do tema

A introdução de agregado de PET, em substituição a areia, no concreto pode surgir como uma forma de melhorar ou manter as propriedades nos estados fresco e endurecido de um concreto não estrutural, contribuindo indiretamente para o aspecto ambiental. Isto porque o PET, reprocessado e reaproveitado, poderia substituir parte da areia no traço do concreto e assim não seria descartado no meio ambiente, o que ainda reduziria o consumo de um recurso natural extraído da natureza e presente em jazidas não renováveis.

Os efeitos negativos da utilização da areia para a produção de concreto seriam minimizados, já que, como foi percebido por Filho et al. (2009, p. 154), “a extração de areia [...] proporciona impactos adversos de pequena magnitude e média duração”. Além disto, haveria uma redução da problemática relacionada ao acúmulo de embalagens de PET no

ecossistema, instigando, com isso, as gerações atuais e futuras a usufruir dos recursos naturais de forma mais consciente e harmônica.

Desta forma, é de extrema necessidade associar estudos acadêmicos a formas mais eficientes de utilizar os recursos não renováveis, tão consumidos pelo setor da construção civil. Assim sendo, esta pesquisa visa contribuir no estudo das propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido ao ter material reciclável inserido em sua composição. Nesse trabalho, a variável estudada é a substituição parcial de areia por PET no traço de um concreto de 20 MPa, que é o limite que divide os concretos não estruturais daqueles estruturais (PEDROSO, 2009).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar as propriedades no estado fresco e no estado endurecido de um concreto não estrutural, com substituição volumétrica parcial da areia natural por agregado de PET, nas porcentagens de 0%, 5% e 10%.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar caracterização dos agregados convencionais e de PET;
- Revisar a literatura sobre o tema e propor teores de agregado de PET a serem aplicados, substituindo a areia, em um concreto não estrutural;
- Comparar as propriedades (consistência, resistência à compressão axial, absorção de água, índice de vazios e massa específica) de um concreto padrão com as de outros que apresentam substituição, em volume, de areia por agregado de PET, nos teores de 5% e 10%.

1.3 Delimitações do trabalho

É necessário ter em vista as diversas possibilidades de teores de polietileno tereftalato a serem substituídos no concreto, assim como a abrangência de propriedades do concreto que poderiam ser avaliadas nos estados fresco e endurecido, entre estas: tempo de pega, teor de ar incorporado, resistência à abrasão e durabilidade. A fim de limitar o escopo do estudo, este abordou apenas algumas propriedades (consistência, absorção de água, índice de vazios, massa específica e resistência à compressão), com porcentagens de substituição de 5% e 10%, sendo estas escolhas feitas ao se considerar as bibliografias referentes ao tema.

2. O CONCRETO

Os materiais de construção “[...] são tão importantes que a História, nos seus primórdios, foi dividida conforme a predominância do emprego de um ou outro material. É o caso, por exemplo, da Idade da Pedra ou da Idade do Bronze” (BAUER, 2015, p. 2). O concreto é um dos materiais de construção mais estudados no mundo, isto devido a sua capacidade de ser moldável, sofrer baixa deterioração quando em contato com água e resistir às cargas de compressão consideravelmente elevadas (PEDROSO, 2009). Entretanto, esta mistura - composta basicamente por cimento, areia, brita e água - só alcança tal desempenho se seus ingredientes estiverem bem proporcionados.

Como consequência do uso desenfreado do concreto vieram estudos em busca de formas de melhorar seu desempenho e torná-lo mais econômico. Pode-se dizer que um dos marcos para maiores aprofundamentos sobre propriedades do material ocorreu entre os anos de 1890 e 1900, quando se descobriu que “a adição de gipsita ao moer o clínquer age como agente retardador de pega do concreto” (CIMENTO.ORG, 2008).

Aliado à preocupação com a questão econômica do processo produtivo está a questão ambiental. De acordo com uma análise recente do Conselho Internacional de Construção (CIB), a construção civil é considerada o setor de atividades humanas com maior consumo de recursos naturais e utilização de energia de forma intensiva (GOVERNO DO BRASIL, 2014).

Ao se utilizar o concreto é de extrema relevância levar em consideração as propriedades desejadas nos estados fresco e endurecido, atendendo às especificações de projeto. Desta forma, aspectos como trabalhabilidade e resistência à compressão precisam ser adequados às características da estrutura e das densidades de armadura nas formas.

A trabalhabilidade, medida pelo abatimento do concreto, é característica do estado fresco deste material e essencial para propiciar a facilidade de lançamento e adensamento do concreto nas formas, evitando a formação de ninhos de concretagem. A resistência à compressão, propriedade do material a ser adquirida no estado endurecido, também precisa ser atingida, sob risco de causar colapso da estrutura. Esses requisitos, de acordo com Mehta e Monteiro (1994), são normalmente os mais importantes no cotidiano das obras.

2.1 Agregados no concreto

Bauer (2015, p. 104) afirma que “os agregados constituem um componente importante no concreto, contribuindo com cerca de 80% do peso e 20% do custo de concreto estrutural sem

aditivos, de f_{ck} da ordem de 15 MPa”. Não obstante, o mesmo autor ressalta que este componente tem correlação com propriedades do concreto de extremo interesse no setor construtivo em geral. Entre estas estão: resistência mecânica (à tração, abrasão e compressão), trabalhabilidade, reatividade potencial, permeabilidade e etc.

Um exemplo de fator de relevância para características do concreto é o formato dos agregados e o seu teor na mistura. Mehta e Monteiro (1994, p. 22) confirmam que “quanto mais elevada a proporção de partículas chatas e alongadas, maior será a tendência do filme de água se acumular próximo à superfície do agregado”, o que provoca uma fragilidade na região de transição pasta-agregado, fenômeno denominado exsudação interna (Figura 1).

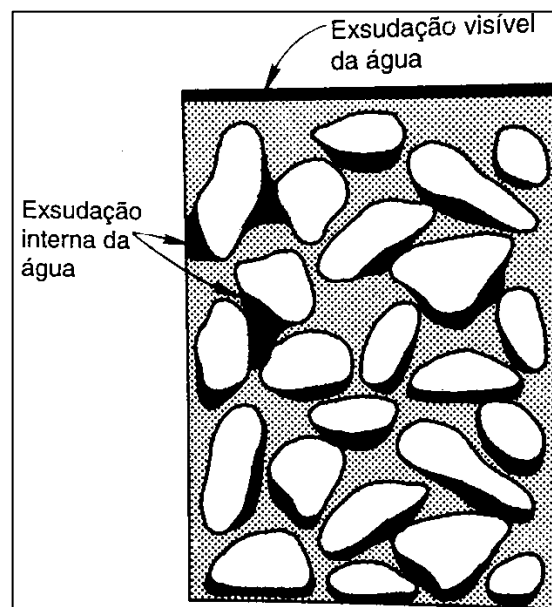


Figura 1 - Representação da exsudação interna em concreto recém-lançado.

Fonte: Mehta e Monteiro (1994, p. 22).

A forma mais adequada para os grãos é aquela cuja dimensão é aproximadamente a mesma nos três eixos, o que proporciona distribuição igualitária da água de amassamento, melhorando a trabalhabilidade, a compacidade do material no estado endurecido e, conseqüentemente, a resistência (NETO, 2011).

Já a importância da massa específica do agregado se encontra no fato desta influenciar na massa específica do concreto, uma vez que a produção de concretos leves, com massa específica menor que 2.000 Kg.m^{-3} (PEDROSO, 2009), proporciona a redução de custos com estrutura, que estariam submetidas a cargas inferiores.

Os agregados naturais são retirados nos areeiros e nas cascalheiras, sendo os processos de extração mais comuns aqueles que envolvem a retirada por drenagem direta do rio e de taludes de solo localizados em suas margens (NETO, 2011), o que resulta em impacto constante na vida marinha local, geração de poeira e resíduos, entre outros problemas.

Além dos agregados naturais, existem ainda os agregados britados, produzidos a partir do afloramento das rochas e que envolve, geralmente, a aplicação de explosivos para a desagregação (NETO, 2011), procedimento que também provoca diversas perturbações ambientais.

A brita tem papel de relevância no desenvolvimento de resistências, pois a combinação de seu diâmetro máximo elevado com a distribuição granulométrica bem graduada pode levar a uma redução da água de amassamento, o que também pode, por outro lado, levar à formação de zonas de transição mais fracas, com consequente formação de mais microfissuras (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A areia, por sua vez, também é um recurso fundamental para o concreto e amplamente utilizado na construção civil, com baixo valor unitário, entretanto “não se pode negar os problemas ambientais causados pela sua extração” (CANELLAS, 2005, p. 41). Por tal fato, é de fundamental importância procurar por alternativas de materiais que a substituam, ao menos parcialmente, pois é verdade que a produção do concreto representa considerável fração do destino de areia empregada no setor construtivo, uma vez que, além de preencher lacunas deixadas pelas pedras, proporciona economia no volume de cimento utilizado.

2.2 PET e sua aplicação no concreto

Similarmente causadores de impactos ambientais, os plásticos são polímeros obtidos através da junção de moléculas menores denominadas monômeros. Os mesmos representam parte considerável dos resíduos domésticos pós consumo, levando até 500 anos para serem decompostos e sendo, por muitas vezes, descartados de maneira inapropriada no ecossistema (MACHADO, 2013), como é possível notar na Figura 2.



Figura 2 - Canal do Arruda, na Zona Norte do Recife, repleto de plásticos.

Fonte: TV Globo, 2017.

Embora a taxa de crescimento anual de reciclagem de plásticos no Brasil, de 2003 a 2007, tenha sido de 9,2% (MACHADO, 2013) e continue crescendo, busca-se incessantemente por formas de reduzir os impactos por eles causados.

Entre os polímeros mais reciclados está o polietileno tereftalato (PET), usado na fabricação de embalagens de bebidas, refrigerantes e produtos farmacêuticos, por exemplo. De acordo com Alves et al. (2015), o PET representa um problema para o poder público, uma vez que, além de reduzir a capacidade de armazenamento dos aterros, torna o solo estanque superficialmente.

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do PET (2012), o polietileno tereftalato pode ser classificado quimicamente como um polímero termoplástico da família dos poliésteres, sendo amplamente utilizado nas indústrias para fabricação de garrafas, medicamentos, produtos de limpeza e cosméticos.

O PET é produzido industrialmente através da esterificação direta do ácido tereftálico purificado (PTA) com o monoetileno glicol (MEG), em um processo denominado polimerização por adição, representado na Figura 3.

Muito embora estudos como o de Romão et al. (2009) afirmem que pode haver formação de subprodutos após o terceiro ciclo de processamento (reciclagem) do polietileno tereftalato e que, durante o mesmo processo, o polímero sofre degradação termomecânica e termo-oxidativa, este fator não será considerado no presente trabalho, pois o PET avaliado não foi submetido a tal processo anteriormente.

Uma peculiaridade do PET é tender a se despolimerizar quando inserido em meio ambiente alcalino sob elevadas temperaturas, formando ácido tereftálico. O processo é utilizado por várias bibliografias, pois como resultado do excesso de solução alcalina se obtém o aumento da velocidade de reação de despolimerização (DI SOUZA, TORRES e FILHO, 2008).

2.2.2 Concreto com agregado de PET

Como constatado por Canellas (2005); Cândido, Barreto e Cabral (2014); Guerra, Rocha e Okabayashi (2017) e diversos outros autores, o PET pode ser adicionado ao concreto ou argamassa, substituindo uma parcela do agregado miúdo, na forma de flocos (Figura 5), também chamados de flakes, quando não se deseja elaborar peças com funções estruturais. Com este procedimento há aplicação de um material que poderia ser descartado incorretamente nas ruas e uma redução no consumo de areia, cuja extração provoca consequências ambientais. Neste estudo foram utilizados flakes de PET disponibilizados pela empresa SulPET Plásticos, que passaram por revalorização (moagem) através de reciclagem mecânica.



Figura 5 - Flocos de PET.

Fonte: Autor, 2018.

O estudo desenvolvido por Fonseca, de Almeida e Vinhas (2014) avaliou o comportamento do polietileno tereftalato quando submetido à hidrólise alcalina, mostrando-se que, quando inserido em meio alcalino e submetido a temperaturas estáveis e elevadas (a partir de 70 °C), o polímero produziu etilenoglicol (EG) e ácido tereftálico (PTA). Isso mostra que a aplicação do polímero no concreto deve possuir restrições, uma vez que o concreto é naturalmente alcalino e pode estar submetido a elevadas temperaturas, o que poderia levar a produção de PTA, com consequente redução do pH do concreto.

Além disso, de acordo com os mesmos autores, o formato de PET em flocos proporciona maior rendimento da despolimerização pela maior área da partícula em comparação ao PET em forma de pellets (arredondados). Portanto, ao considerar que as condições de temperatura e alcalinidade as quais o concreto está submetido ao longo de sua vida útil poderiam acarretar em formação de PTA, com redução do pH do concreto armado/protendido e, possivelmente, uma diminuição ou até mesmo rompimento da camada de passivação da armadura, não seria prudente aplicar os flakes de PET em peças de cunho estrutural.

2.3 Propriedades nos estados fresco e endurecido dos concretos com agregado de PET

Tendo em vista a qualidade do concreto endurecido, as propriedades desejadas para o concreto fresco são as que asseguram a obtenção de mistura de fácil transporte, lançamento e adensamento, sem segregação, e que, depois do endurecimento, se apresenta homogênea, com o mínimo de vazios. (BAUER, 2015, p. 267).

Ao executar uma estrutura de concreto, é essencial que este material, quando recebido, possua as características mais adequadas para atender às necessidades de projeto. Um dos testes mais usualmente utilizados em campo para avaliar algumas destas características, e que expõe a necessidade de estudar o comportamento do concreto no estado fresco, é o Slump Test ou abatimento pelo tronco de cone. Com ele é possível verificar se o compósito possui tendência à segregação e exsudação, se possui a trabalhabilidade apropriada à atividade executada, tornando possível planejar a melhor solução de transporte, lançamento e adensamento para o mesmo.

Similarmente, as propriedades do concreto no estado endurecido também devem ser estudadas a fundo, uma vez que, de acordo com a situação, o projeto exigirá que o concreto atinja requisitos mínimos de resistência à compressão, durabilidade, permeabilidade, entre outros.

Diversos estudos já foram realizados a fim de avaliar características no estado fresco e endurecido e, desta forma, oferecem parâmetros de referência para esta pesquisa, sendo de extrema importância para a elaboração de estimativas coerentes de resultados.

Baseado no fato dos grãos de PET serem menos densos, com menor índice de absorção de água e, de maneira geral, interagirem de forma diferente da areia ao compor um concreto convencional, algumas das propriedades do compósito nos estados fresco e endurecido devem ser afetadas. Entre elas, presume-se que, com o aumento no percentual de substituição de agregado miúdo por material granular de PET e manutenção da relação água-cimento, o concreto se tornará mais propenso a absorção de água pelo fato do PET não absorver a água que seria naturalmente absorvida pela areia (CANELLAS, 2005), resultando em aumento do número de vazios após secagem do material e, conseqüentemente, menor resistência mecânica. Além disso, o concreto pode ter sua massa específica reduzida por conta da menor massa específica do PET, em comparação com a areia, acarretando a produção de concretos mais leves.

2.3.1 Propriedades no estado fresco

Com relação à consistência, estudos como o de Modro et al. (2009) concluíram que os valores de abatimento possuem tendência de redução para traços com substituição de areia por resíduos de PET, em volume, para teores de 10%, 20%, 30% e 40%, chegando a quedas de aproximadamente 20% neste parâmetro ao se aumentar o teor de flakes de PET de 10% para 20%. Já no estudo de Jardim (2016), onde um concreto dosado com substituição, em volume, de areia por agregado de PET reciclado, em teores de 10% e 15%, constatou-se que os concretos permaneceram trabalháveis e coesos, não comprometendo a sua moldagem.

Vale ressaltar que, apesar de existirem bibliografias indicando uma provável redução do abatimento para concretos com maiores índices de substituição de areia por PET para teores acima de 10%, é possível que o comportamento do concreto no estado fresco não siga a mesma tendência para teores que variam entre 0% e 10%. Além disso, a trabalhabilidade pode apresentar alterações a depender da relação água/cimento utilizada e da técnica de mistura aplicada para confecção do concreto, fatos que podem modificar a tendência de diminuição do abatimento.

2.3.2 Propriedades no estado endurecido

Pelo fato de a granulometria do PET não ser eficiente ao preencher os vazios, provavelmente haverá uma redução da resistência mecânica à compressão com o aumento no teor deste tipo de agregado ao substituir a areia natural (OLIVEIRA et al., 2016). Ao avaliar uma substituição de 10% de PET, em volume, em relação à areia natural, Jardim (2016) chegou a uma conclusão semelhante, relatando queda deste mesmo parâmetro na ordem de 4% a 5%, para idades entre 7 e 28 dias, quando utilizado 10% de PET na composição do traço (Figura 6). Após estudar a variância dos resultados, a mesma autora concluiu que, matematicamente, não houve alterações significativas na propriedade.

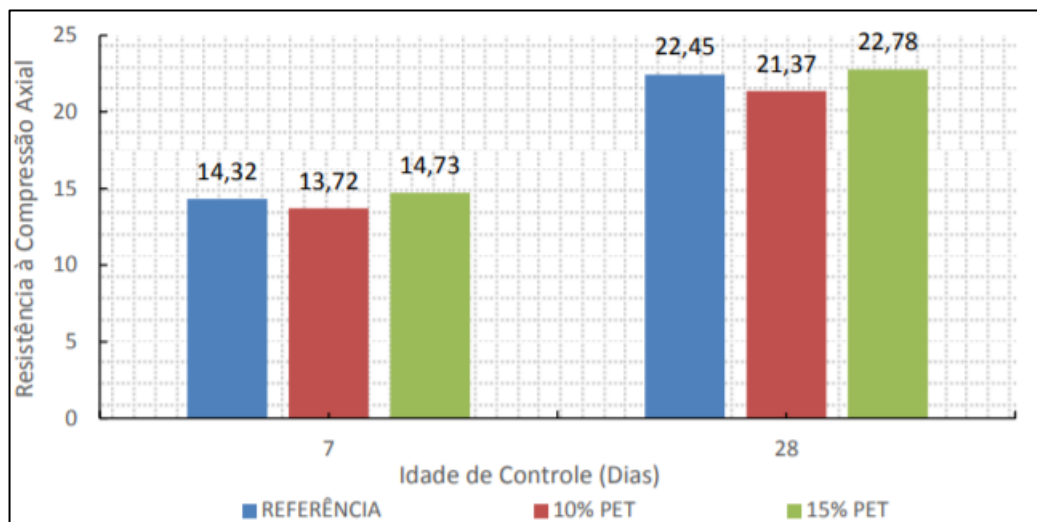


Figura 6 - Resistência média à compressão axial.

Fonte: Jardim, 2016, p. 58.

A pesquisa de Canellas (2005), desenvolvida substituindo, em volume, o agregado miúdo por agregado de PET em teores de 10%, 30% e 50%, concluiu que quanto maior a porcentagem incorporada de PET, maior é a porosidade do concreto. Isto ocorre devido a característica não absorvente do PET, que faz com que a quantidade de vazios após a secagem seja aumentada pela maior disponibilidade de água.

Além disso, a mesma autora pontua que existe redução da resistência à compressão a cada aumento de porcentagem incorporada de agregado de PET, em substituição volumétrica da areia (Figura 7). Em seu estudo, concluiu-se que os teores de 10% e 30% de substituição por flakes de PET demonstraram viabilidade de aplicação, pois possibilitaram uma menor perda de resistência à compressão, sendo o teor de 10% aquele de melhor desempenho.

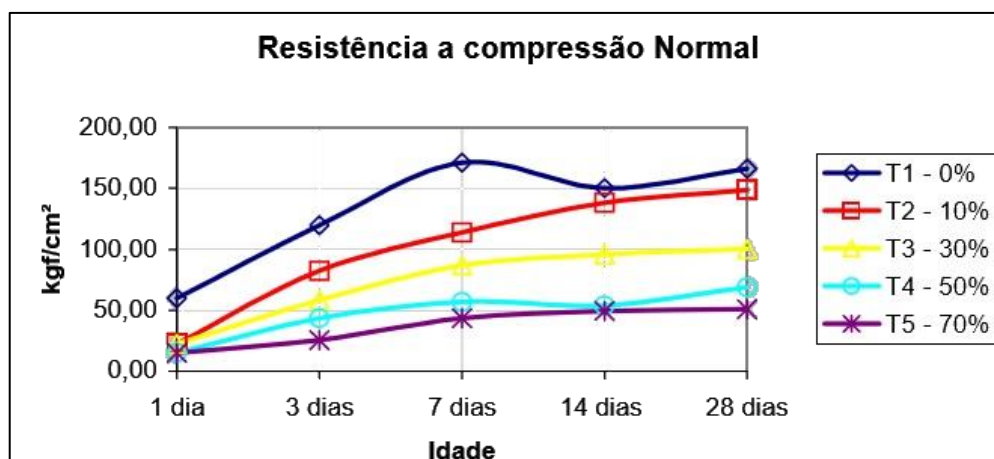


Figura 7 - Gráfico de variação de resistência à compressão, com traço em volume.

Fonte: Canellas, 2005, p. 65.

No estudo de Cândido, Barreto e Cabral (2014), utilizaram-se agregados de PET, em substituição ao volume de areia, nos teores de 15%, 30% e 45%, para a produção de blocos de vedação vertical de concreto de referência com 5,58 MPa. Nele foram avaliadas características geométricas e mecânicas dos blocos, sem função estrutural, além de índices físicos. Os resultados encontrados ressaltaram que os blocos com o menor teor de PET (15%) obtiveram maiores resistências à compressão e uma menor absorção, justificada pela provável redução do índice de vazios das amostras (Figura 8).

AMOSTRA	Características Físicas			Resist. Com. (Mpa)
	Massa Seca (kg)	Absorção (%)	Condutividade térmica (W/m.K)	
REFERÊNCIA	2,88	12,77	2,33	5,58
15%	2,84	10,92	2,28	5,71
30%	2,58	13,34	2,36	3,54
45%	2,56	17,19	2,05	2,73

Figura 8 - Resumo das características físicas e mecânicas ensaiadas.

Fonte: Cândido, Barreto e Cabral, 2014, p. 2429.

Assim sendo, o presente estudo torna-se relevante, pois pretende aprofundar-se nesta análise. Na pesquisa, a substituição volumétrica dos agregados (ou flocos) de PET será realizada em porcentagens de 5% e 10%, menores do que as bibliografias usualmente adotam, em traço de concreto não estrutural - dosado para uma resistência à compressão de 20 MPa - a fim de se avaliar determinadas propriedades nos estados fresco e endurecido. O valor 20 MPa foi escolhido pelo fato de ser o limite que separa concretos não estruturais daqueles considerados de resistência normal, que são aplicados em estruturas (PEDROSO, 2009).

3. METODOLOGIA

Foram produzidos concretos convencionais, não estruturais, para uma resistência à compressão de 20 MPa, a partir da dosagem realizada pelo método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Foram introduzidos agregados de PET moídos, em substituição ao volume da areia, nas proporções 0%, 5% e 10%, e em seguida foi analisada a consistência, no estado fresco, e a resistência à compressão, absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, no estado endurecido.

3.1 Caracterização dos materiais componentes do concreto

Caracterizou-se os materiais componentes do traço do concreto, sendo obtidos valores de massa específica real e unitária para todos os ingredientes, módulo de finura (areia) e composição granulométrica (areia, brita e PET). Esta fase foi necessária para que fosse possível aplicar o método da ABCP na dosagem do concreto.

3.1.1 Cimento

Foi escolhido o cimento Portland CP II-F-32 pela grande oferta no mercado cabense e pretensão de atingir 20 Mpa no traço de referência (0% de PET). A massa específica foi obtida baseando-se nos procedimentos descritos na NBR 16605/2017 - *Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica*. Utilizou-se o frasco de Le Chatelier, sendo obtido um valor da massa específica correspondente a 2.970 kg.m^{-3} .

3.1.2 Água

A água utilizada para confecção do concreto foi fornecida pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), através do sistema de abastecimento de Pirapama, ou seja, esta passou por tratamento e atende aos quesitos de potabilidade para ser aplicada como água de amassamento. A confirmação desta potabilidade por meio de análise físico-química não é necessária, uma vez que a NBR 15900/2009 - *Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos* - afirma: “água de abastecimento público é considerada adequada para uso em concreto e não necessita ser ensaiada”.

3.1.3 Agregado miúdo convencional

Ao analisar duas amostras de areia (NBR NM 248/2003), no estado em que foram compradas e sem peneiramento prévio, obteve-se que a dimensão máxima característica foi de 6,30 mm, demonstrando que o material comprado como areia possuía quantidade considerável de agregados graúdos em seu meio.

Como de acordo com a NBR NM 52/2009 areia é aquela que passa na malha 4,75 mm e é quase totalmente retida na peneira de 75 μm , o material aplicado na confecção dos traços foi apenas aquele passante na peneira de 4,75 mm. A partir deste material obteve-se que a massa específica unitária solta do mesmo era de 1.640 kg.m^{-3} , enquanto a sua massa específica real equivalia a 2.380 kg.m^{-3} , seguindo os parâmetros definidos na NBR 6458/2017. Além disso, o módulo de finura médio ao se estudar duas amostras foi de 2,757, sendo a curva granulométrica do agregado miúdo representada na Figura 9.

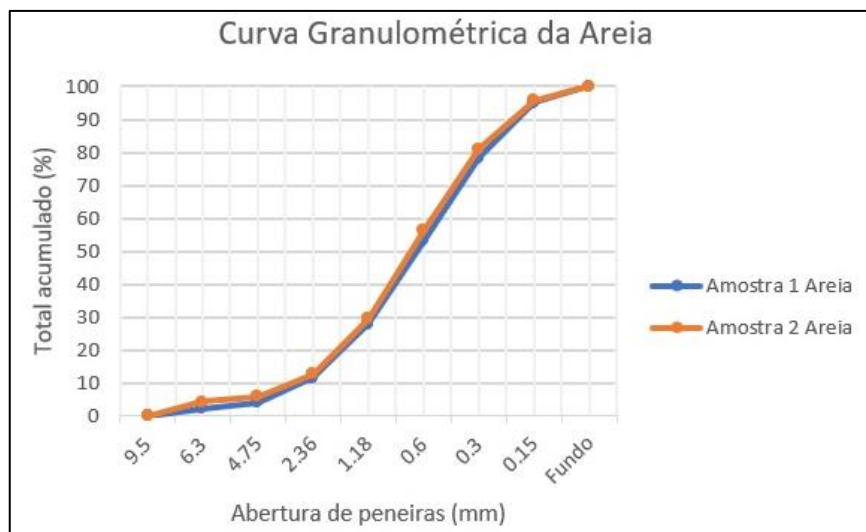


Figura 9 - Curva granulométrica da areia.

Fonte: Autor, 2018.

3.1.4 Agregado de PET

Estudando as características granulométricas (Figura 10) e de massa específica do agregado de PET através de adaptações da NBR 6458/2017 e da NBR NM 248/2003, respectivamente, chegou-se a dimensão máxima característica de 6,30 mm, massa específica real equivalente a 1.543 kg.m^{-3} e massa específica unitária de $329,51 \text{ kg.m}^{-3}$. Além disso, notou-se que sua dimensão nunca se apresentava inferior a 0,60 mm. Cabe ressaltar que para fins desta pesquisa foi utilizado e caracterizado o material PET passante pela peneira de malha 4,75 mm.

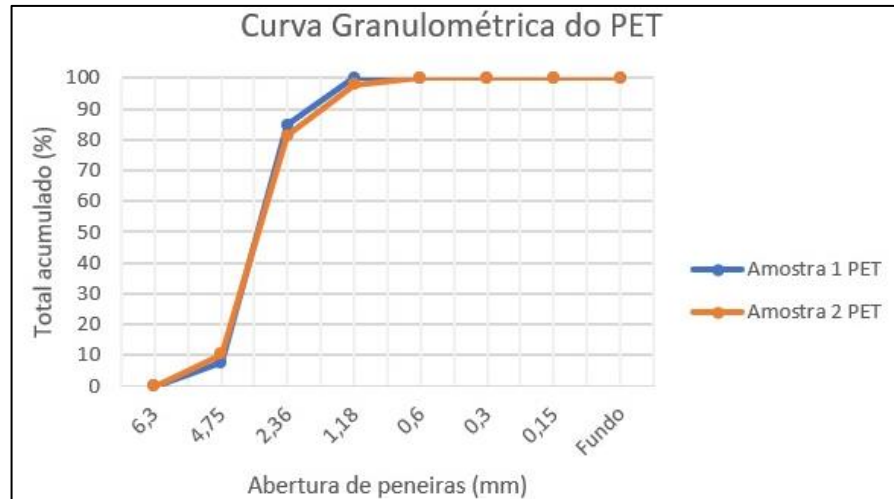


Figura 10 - Curva granulométrica do PET.

Fonte: Autor, 2019.

3.1.5 Agregado graúdo

Baseando-se nos procedimentos preconizados pela NBR NM 248/2003, a dimensão (ou diâmetro) máxima característica obtida foi, como previsto no ato da compra, de 19 mm (Figura 11).

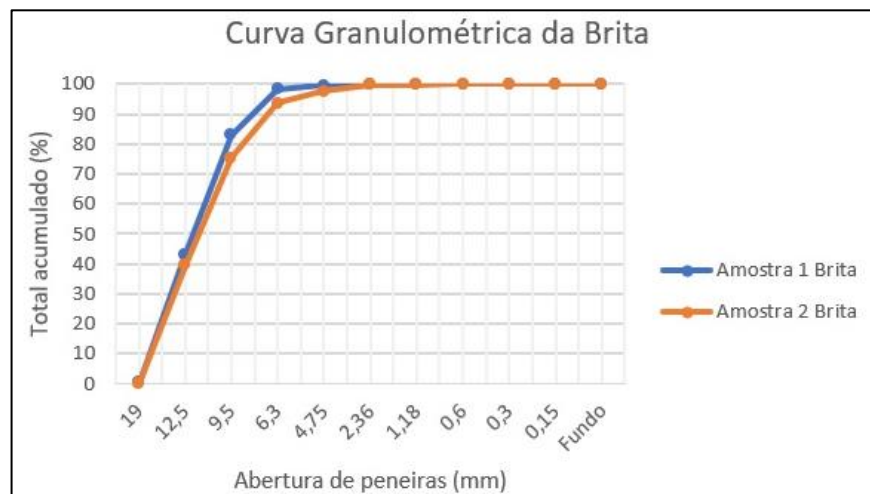


Figura 11 - Curva granulométrica da brita.

Fonte: Autor, 2019.

Com relação à massa específica real, convencionou-se o equivalente a 2.700 kg.m^{-3} , de acordo com o que a bibliografia adota comumente. Por último, as massas unitárias compactada e solta foram calculadas, seguindo as recomendações do método A da NBR NM 45/2006, com ambas resultando no valor aproximado de 1.625 kg.m^{-3} .

Desta forma, dadas as características granulométricas e de massa específica do aglomerante hidráulico e dos agregados, objetivou-se estudar qual proporção era a mais

adequada de acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), a fim de que se elaborasse um concreto com 20 MPa.

3.2 Dosagem do concreto

Os traços dos concretos produzidos com e sem o PET em substituição a areia, encontram-se no Quadro 1. Destaca-se que o traço de referência (CP0) foi definido por meio do método de dosagem da ABCP, adaptado a partir do método desenvolvido pelo American Concrete Institute (ACI), utilizando os seguintes dados: concreto de 20 MPa e abatimento de (70 ± 10) mm; cimento CP II-F-32 de massa específica 2.970 kg.m^{-3} ; areia com módulo de finura (MF) igual a 2,757 e massas específicas real e unitária de agregado solto equivalentes a 2.380 kg.m^{-3} e 1.640 kg.m^{-3} , respectivamente; flakes de PET possuindo massa específica real de 1.543 kg.m^{-3} e; brita com diâmetro máximo de 19 mm, massa específica real de 2.700 kg.m^{-3} e massa específica unitária de agregado compactado/solto valendo 1.625 kg.m^{-3} . Os traços CP5 e CP10 representam as substituições volumétricas de 5% e 10%, respectivamente.

Quadro 1 - Traços de concreto, em massa, considerando os agregados no estado seco.

Traço	Cimento	Areia Seca	PET	Brita Seca	Relação a/c
CP0	1	1,87	0	3,12	0,57
CP5	1	1,78	0,02	3,12	0,57
CP10	1	1,68	0,04	3,12	0,57

Vale salientar que a relação água/cimento não foi reduzida à medida que se aplicava maiores teores de PET no concreto, como realizado por Canellas (2005), por exemplo, pelos baixos teores de substituição aplicados, fato este que não proporciona brusca alteração na trabalhabilidade do concreto. Além disso, para obtenção dos traços foi considerada a umidade calculada da areia de 2,66%.

3.3 Concretagem

Na produção do concreto foi utilizada uma betoneira da marca Motomil, modelo MB 150L, baseando-se na seguinte metodologia:

- 1 - Preparação da betoneira (limpeza com pano úmido);
- 2 - Preparação do traço para argamassa de imprimação (1:1,87:0,52), que teve o objetivo de impedir a absorção de materiais pela betoneira e, consequentemente, a modificação do traço;
- 3 - Descarte do material de imprimação;

- 4 - Colocação da brita, juntamente a aproximadamente metade da água, e mistura por um minuto, em média;
- 5 - Colocação do cimento;
- 6 - Colocação da areia, juntamente a água restante, e mistura por aproximadamente três minutos para posterior utilização do concreto.

Vale ressaltar que a brita utilizada foi lavada e seca ao ar por um dia, estando com aparência levemente úmida superficialmente. Além disso, nos traços CP5 e CP10 o PET em flakes foi incorporado na betoneira após homogeneização com a areia do próprio traço (Figura 12).



Figura 12 - Flakes de PET homogeneizados na areia.

Fonte: Autor, 2018.

3.4 Moldagem e cura dos corpos de prova de concreto

Foram moldados corpos de prova (CP's) cilíndricos de dimensões 10 cm (diâmetro) x 20 cm (altura), com substituição de 0%, 5%, 10% de agregado de polietileno tereftalato em relação ao volume de areia, sendo seis corpos de prova para cada teor. Os traços foram confeccionados de tal forma que à medida que se aumentava o volume de agregado de PET houve uma diminuição proporcional do volume de agregado miúdo. Esta fase teve como base a NBR 5738/2008 – *Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*; e a NBR 9479/2006 – *Câmaras úmidas e tanques de cura para corpos de prova*.

Os CP's avaliados permaneceram em procedimento de cura, imersos em solução saturada de hidróxido de cálcio, por sete dias, período no qual comumente se mantém peças de concreto em cura. Após esse prazo, os corpos de prova permaneceram em uma condição ambiental (ambiente de laboratório) com médias de temperatura e umidade de 27,6 °C e 70,5%, respectivamente, até que chegassem os 28 dias de idade.

3.5 Avaliação de propriedade do concreto no estado fresco

No estado fresco foi analisada a propriedade de consistência, por meio de molde em forma tronco cônica, de acordo com a NBR NM 67/1998 – *Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Este parâmetro indica a facilidade de o concreto ser manuseado e permite analisar o grau de envolvimento da pasta em relação ao agregado, o que é de extrema importância para que o material adquira características esperadas no estado endurecido, como a compactidade, por exemplo. Ressalta-se que o aspecto abatimento foi avaliado uma única vez para cada traço.

3.6 Avaliação das propriedades do concreto no estado endurecido

Foram avaliadas as propriedades de resistência à compressão, absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias de idade. Os ensaios foram norteados pelos procedimentos da NBR 5739/2018 – *Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*; NBR 9778/2009 – *Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica*.

Para o ensaio de resistência à compressão foram avaliados três corpos de prova, por situação, com o objetivo de se ter um valor médio que reduzisse eventuais discrepâncias, sendo adotado o mesmo número de CP's no ensaio que resultou nos parâmetros absorção de água, índice de vazios e massa específica. A preparação das bases dos CP's foi feita através de retificação, sendo a fase de avaliação da tensão máxima de compressão feita com uma prensa da marca EMIC, modelo SSH300, com capacidade de aplicar forças de até 2000 KN. O programa Microsoft Excel foi o responsável pela análise estatística.

Já no ensaio de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica utilizou-se de uma estufa a (60 ± 5) °C para a secagem dos CP's e uma balança hidrostática da marca OHAUS, modelo Adventurer, com capacidade de aferir até 4,1 Kg, na fase final de pesagens seca, úmida e submersa (Figura 13). Ressalta-se que a temperatura aplicada aos CP's - inferior a convencional de (100 ± 5) °C - se deu por conta da possibilidade da formação de

ácido tereftálico no decorrer do período de secagem e que os cálculos dos parâmetros foram feitos através do software Microsoft Excel.



Figura 13 - Balança hidrostática em funcionamento.
Fonte: Autor, 2018.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a identificação dos corpos de prova, optou-se por marcá-los com as seguintes informações: nomenclatura de traço (CP0, CP5 ou CP10), data de desmolde e número de identificação (Figura 14).



Figura 14 - Sistema de identificação dos corpos de prova.
Fonte: Autor, 2018.

4.1 Aspecto do concreto no estado fresco

4.1.1 Abatimento

As amostras de referência (CP0) obtiveram resultado esperado de 70 mm (Figura 15) para o abatimento de acordo com o método de dosagem da ABCP. Com relação às amostras que tiveram PET incorporado em seus traços, possivelmente os parâmetros formato alongado e chato e teor de PET inserido foram os mais relevantes para os resultados de abatimento.



Figura 15 - Abatimento do traço CP0.

Fonte: Autor, 2018.

No traço CP5 o abatimento foi superior em relação ao concreto de referência, provavelmente porque o pequeno teor de PET incorporado proporcionou ao concreto um efeito de deslizamento entre a pasta e o agregado, por conta da superfície menos rugosa dos flakes de PET em comparação à areia, gerando abatimento de 90 mm (Figura 16).



Figura 16 - Abatimento do traço CP5.

Fonte: Autor, 2018.

Já no traço CP10, o abatimento encontrado foi mais baixo em relação ao do traço CP5, correspondendo a 80 mm (Figura 17). É possível que, com a duplicação da proporção de agregados de PET de superfície chata e alongada, esta redução da trabalhabilidade tenha sido propiciada devido à redução do efeito de rolamento da pasta sobre o agregado de PET, uma vez que maiores quantidades de agregados com superfície alongada e chata provocam um maior acúmulo de água em suas superfícies lamelares, diminuindo a distribuição da água pela mistura (exsudação interna).



Figura 17 - Abatimento do traço CP10.

Fonte: Autor, 2018.

Com base no ensaio do abatimento do tronco de cone (NBR NM 67/1998), os resultados obtidos a partir da avaliação das amostras estudadas são destacados no Quadro 2.

Quadro 2 - Abatimentos para os diferentes traços.

Traço	Abatimento (mm)
CP0	70
CP5	90
CP10	80

Resumidamente, pode-se supor que, enquanto no traço CP5 houve melhor efeito de deslizamento e uma menor quantidade de água retida em suas partículas lamelares, o aumento do teor no traço CP10 provocou maior acúmulo de água sob as superfícies lamelares/chatas do agregado e, conseqüentemente, fez com que o abatimento fosse menor que o CP5.

De maneira geral, a substituição de ambos os teores de flakes de PET (5% e 10%) proporcionou um abatimento maior que o traço de referência, o que poderia ser um fator

benéfico para o manuseio de concretos produzidos dessa forma. Entretanto, o traço CP5 apresentou abatimento superior a tolerância para a qual o traço foi calculado de (70 ± 10) mm, o que poderia representar um problema para o tipo de moldagem exigida.

Os valores superiores de abatimento obtidos neste trabalho apresentam diferenças em relação aos resultados das pesquisas de Modro et al. (2009) e de Oliveira et al. (2016), constatando uma mudança na tendência quando teores mais baixos do polímero são inseridos no concreto, substituindo a areia.

4.2 Aspectos do concreto no estado endurecido

4.2.1 Resistência à compressão axial

Os resultados de tensão de ruptura (σ_r) foram de, em média, 26,93 MPa para o traço CP0, sendo obtidos valores de resistência à compressão máxima e mínima de 30,40 MPa e 23,60 MPa, respectivamente, com desvio padrão de 3,40 MPa. Os cálculos de dosagem de concretos com resistência característica à compressão de projeto (f_{ck}) de 20 MPa e desvio padrão de 4,0 MPa, de acordo com o método da ABCP, resultaram uma resistência média alcançada aos 28 dias (f_{c28}) de 26,60 MPa, logo, o valor médio de tensão de ruptura do concreto de referência obtido no ensaio, (26,93 MPa) condiz com o esperado.

No traço CP5, a média dos resultados de tensão de ruptura (σ_r) foi de 26,83 MPa, com valores de resistência à compressão máxima e mínima de 29,10 MPa e 25,20 MPa, respectivamente, obtendo desvio padrão de 2,03 MPa. Notou-se que a substituição volumétrica de polietileno tereftalato no teor de 5% resultou em redução da média de resistência à compressão axial de, aproximadamente, 0,37% em relação àqueles de referência, o que representa uma queda pouco expressiva por estar bastante próxima da média do traço CP0.

Por outro lado, no traço CP10, obteve-se como média dos resultados de tensão de ruptura (σ_r) o valor de 27,77 MPa, sendo as resistências à compressão máxima e mínima foram avaliadas em 29,30 MPa e 26,00 MPa, respectivamente, e o desvio padrão equivalente a 1,66 MPa. Notou-se que os concretos com incorporação de polietileno tereftalato obtiveram desempenho de resistência à compressão axial superior de aproximadamente 3,12% em relação àqueles de referência, o que indica pouca interferência no parâmetro ao se realizar essa substituição. Os resultados do ensaio podem ser conferidos de forma resumida no Quadro 3.

Quadro 3 - Resistência à compressão, média, variação percentual em relação ao concreto de referência e desvio padrão para os diferentes traços.

Traço	σ_r (MPa)	Média (MPa)	Variação percentual em relação ao concreto de referência (%)	Desvio padrão (MPa)
CP0	30,4	26,93	0,00	3,40
	23,6			
	26,8			
CP5	29,1	26,83	- 0,37	2,03
	26,2			
	25,2			
CP10	28,0	27,77	+ 3,12	1,66
	29,3			
	26,0			

Os resultados (Figura 18) indicam que o teor de substituição, em volume, do PET em 5% e 10% provoca pouca interferência nos valores de tensão de ruptura dos CP's, quando submetidos à carga axial. Jardim (2016) observou semelhante comportamento ao fazer o mesmo tipo de substituição em teores de 10% e 15%, o que poderia sugerir que o procedimento de substituição em porcentagens próximas dessa magnitude não interfere de maneira significativa na propriedade de resistência à compressão.

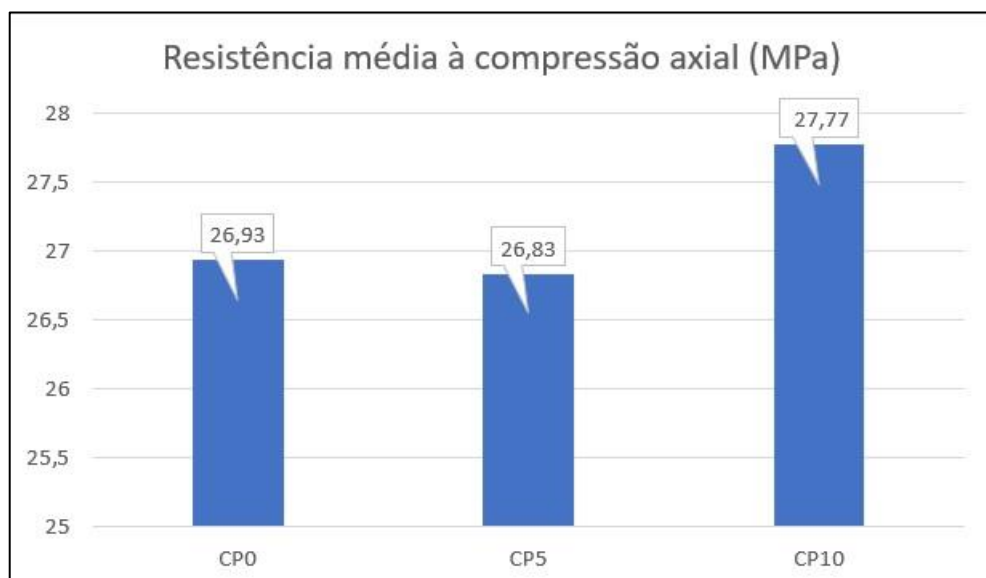


Figura 18 - Resistências médias à compressão axial dos diferentes traços, em MPa.

Fonte: Autor, 2019.

4.2.2 Absorção de água

Nos concretos avaliados com relação à absorção de água foi obtido que, em média, há uma absorção água de 4,68% para o traço CP0, com desvio padrão de 0,09%, 4,16% no traço CP5 (queda de 0,52% em relação ao traço CP0), possuindo desvio padrão de 0,16%, e 3,93% para o traço CP10 (diminuição de 0,75% ao comparar com o traço de referência) com desvio padrão de 0,06%, cujos valores podem ser conferidos por meio do Quadro 4.

Quadro 4 - Absorção de água, média, variação percentual em relação ao concreto de referência e desvio padrão para os diferentes traços.

Traço	Absorção de água (%)	Média (%)	Variação percentual em relação ao concreto de referência (%)	Desvio Padrão (%)
CP0	4,58	4,68	0,00	0,09
	4,72			
	4,75			
CP5	4,02	4,16	- 0,52	0,16
	4,14			
	4,33			
CP10	3,86	3,93	- 0,75	0,06
	3,97			
	3,95			

No caso estudado o teor de PET adicionado não levou a uma maior taxa de absorção de água, conforme obtido por Canellas (2005), que estudou teores de 10%, 30% e 50%. Provavelmente, os teores menores avaliados de 5% e 10% contribuíram para o envolvimento dos agregados pela pasta, o que, consequentemente, contribuiu discretamente para a formação de concretos com menor quantidade de poros permeáveis.

4.2.3 Índice de vazios

Nos traços de referência, obteve-se uma média de índice de vazios de 10,29%, com um desvio padrão de 0,18%, enquanto para o traço CP5 foi registrada média 9,29% para o parâmetro, com desvio padrão de 0,32%. Já no traço CP10 o índice de vazios médio foi de 8,77%, sendo o desvio padrão das amostras avaliadas de 0,10%.

O parâmetro índice de vazios representa a razão entre o volume ocupado pelos poros permeáveis em relação ao volume total da amostra e está diretamente relacionado com os resultados obtidos no ensaio de absorção de água. A análise completa é apresentada no Quadro 5.

Quadro 5 - Índice de vazios, média, variação percentual em relação ao concreto de referência e desvio padrão para os diferentes traços.

Traço	Índice de vazios (%)	Média (%)	Variação percentual em relação ao concreto de referência (%)	Desvio Padrão (%)
CP0	10,30	10,29	0,00	0,18
	10,52			
	10,06			
CP5	9,00	9,29	-1,00	0,32
	9,24			
	9,63			
CP10	8,66	8,77	- 1,52	0,10
	8,86			
	8,80			

Considerando que houve diminuição na formação de poros permeáveis nos traços CP5 e CP10 - fato este indicado pela redução dos índices de absorção de água ao se incorporar os flocos de PET - era plausível esperar que o índice de vazios seguisse a mesma tendência de queda. A literatura considera que apresentar porosidade entre 15% e 20% é um dos fatores para definir um concreto como poroso (MONTEIRO, 2010). Portanto, ao se considerar os valores médios do parâmetro - sempre abaixo de 11% - e as variações percentuais de índice de vazios encontradas nesse estudo (1% e 1,52%), conclui-se que a interferência nesse parâmetro, causada pela substituição parcial da areia por PET, pode ser considerada pouco significativa.

4.2.4 Massa específica

Registrou-se que houve uma diminuição dos valores de massa específica ao se substituir a areia natural por flocos PET, com valores de, em média, $2,50 \text{ g.cm}^{-3}$ para o traço CP0 (desvio padrão de $0,01 \text{ g.cm}^{-3}$), $2,46 \text{ g.cm}^{-3}$ no traço CP5 (desvio padrão nulo) e $2,45 \text{ g.cm}^{-3}$ para o CP10 (desvio padrão de $0,01 \text{ g.cm}^{-3}$). Ao realizar comparação com o traço de referência CP0, observa-se que no traço CP5 foi registrada queda de 1,6%, enquanto para o CP10 esta redução foi equivalente a 2,0%. No Quadro 6 são apresentados os valores obtidos para cada amostra de traço.

Quadro 6 - Massa específica, média, variação percentual em relação ao concreto de referência e desvio padrão para os diferentes traços.

Traço	Massa específica (g.cm ⁻³)	Média (g.cm ⁻³)	Variação percentual em relação ao concreto de referência (%)	Desvio padrão (g.cm ⁻³)
CP0	2,50	2,50	0,0	0,01
	2,49			
	2,51			
CP5	2,46	2,46	- 1,6	0,00
	2,46			
	2,46			
CP10	2,45	2,45	- 2,0	0,01
	2,45			
	2,44			

O resultado era esperado, uma vez que houve substituição parcial por um agregado com menor massa específica que o original, o que propiciou redução deste parâmetro para o concreto a medida que se elevavam os teores de substituição.

5. CONCLUSÕES

Na pesquisa, após realizar análise granulométrica dos agregados e propor teores de agregado de PET a serem aplicados (5% e 10%, em volume), substituindo a areia, em um concreto não estrutural, fez-se a comparação de algumas das suas propriedades (consistência, absorção de água, índice de vazios, massa específica e resistência à compressão).

Com esse estudo foi possível concluir que no estado fresco do concreto a substituição em volume da areia natural em teores entre 5% e 10% de agregados de PET de granulometria similar proporciona, de maneira geral, aumento do seu abatimento. Entretanto, no traço CP5, com 90 mm de abatimento, possivelmente esse aumento se deu pela menor rugosidade do agregado de PET em comparação à areia, enquanto no CP10 houve abatimento um pouco menor (80 mm), mas ainda maior que o CP0 (70 mm), gerado provavelmente pelo início da formação do fenômeno exsudação interna, que poderia ter sido causado por conta de um teor mais elevado de agregado lamelar.

Ao avaliar o comportamento do concreto no estado endurecido, as médias das resistências à compressão não diferiram significativamente, sendo 26,93 MPa para o traço de referência, 26,83 MPa para o traço CP5 (decréscimo de 0,37%, aproximadamente) e 27,77 MPa no traço CP10 (aumento em torno de 3,12%). Tanto a absorção de água quanto o índice de vazios foram reduzidos à medida que se substituíu, em volume, o agregado miúdo por agregado de PET, com os traços CP10 atingindo queda de 0,75% na absorção de água e redução de 1,52% no índice de vazios, em relação ao traço CP0. A massa específica também apresentou redução ao se substituir maiores volume de agregados de PET por areia, com uma diminuição média de 1,6% no traço CP5 e 2% para o traço CP10, em relação ao traço de referência.

Levando em conta as características do concreto com substituição parcial, em volume, da areia por PET e sua finalidade não estrutural, sua aplicação poderia ser direcionada a áreas com proteção contra incidência solar. Entre elas, sugere-se: blocos de alvenaria não estrutural para divisão de ambientes internos, contrapisos e elementos pré-moldados com uso em espaços cobertos.

Embora seja prematuro afirmar que existe, de fato, vantagem ao se realizar substituição volumétrica do agregado miúdo por agregado de PET sem antes verificar a sua interferência em outras propriedades mecânicas, conclui-se que há potencialidades ao se adotar o procedimento. A principal se encontra no caráter ambiental de inserção do resíduo - que geraria grande impacto ambiental ao ser descartado incorretamente - em um mercado altamente

dinâmico, como o da construção civil. Secundariamente, em teores reduzidos, o agregado de PET poderia proporcionar ao concreto aumento da trabalhabilidade e redução da massa específica sem que houvesse perdas significativas das resistências à compressão.

Por outro lado, aspectos como tempo de pega, teor de ar incorporado, resistência à abrasão e durabilidade são de extremo interesse para as aplicações não estruturais de concretos e, além disso, pesquisas como a de Jardim (2016) já avaliaram que teores de até 15% de substituição da areia por flocos de PET, em volume, provocaram poucas alterações no desempenho do concreto. Portanto, para uma análise mais abrangente, sugere-se que, no futuro, se estudem outras propriedades relevantes nos estados fresco e endurecido do concreto, além de um maior número de teores e amostras avaliadas. Isso poderia oferecer ao público, de forma ampla, maior certeza do que acarreta a substituição parcial, em volume, do agregado miúdo do concreto por agregado de PET.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, A. L. et al. **Estudo das propriedades mecânicas de compósitos obtidos através da incorporação do pet moído em microconcreto endurecido**. Revista Engenharia e Construção Civil, Curitiba - Paraná, Vol. 2, nº 1, p. 29 - 38, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET (ABIPET). **Resina PET - História**. 2012. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=46>>. Acesso em 01 out. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738** - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739** - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6458** - Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7222** - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9479** – Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova de argamassa e concreto. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778** – Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13230**. Embalagens e acondicionamentos plásticos recicláveis - Identificação e simbologia. Rio de Janeiro, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16605** – Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52** – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

ASSUNÇÃO, J. W. **Curvas de dosagem para concretos convencionais e aditivados convencionados com materiais da região Nordeste do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. UFSC, Santa Catarina, 2002.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5. ed. revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CÂNDIDO, L. F.; BARRETO, J. M. L.; CABRAL, A. E. B. **Avaliação de blocos de concreto produzidos com PET reciclado**. In: ENTAC, 2014. Anais do XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Maceió, 2014. p. 2423-2432.

CANELLAS, S. S. **Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2005.

CIMENTO.ORG. **Concreto**. Brasília, 2008. Disponível em:<cimento.org/concreto/>. Acesso em 25 jan. 2018.

DI SOUZA, L.; TORRES, M. C. M.; FILHO, A. C. R. **Despolimerização do Poli (Tereftalato de Etileno) – PET: Efeitos tensoativos e excesso de solução alcalina**. Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, nº4, p.334-341, 2008.

ESTADÃO. **Brasil produz lixo como primeiro mundo, mas faz descarte como nações pobres**. 2016. Disponível em: <sustentabilidade.estadao.com.br/blogs/ambiente-se/brasil-produz-lixo-como-primeiro-mundo-mas-faz-descarte-como-nacoes-pobres/>. Acesso em 21 nov. 2018.

FILHO, P. A. N. et al. **Impactos ambientais da extração de areia no canal ativo do Rio Canindé, Paramoti, Ceará**. Revista de Geologia, Ceará, Vol. 24, nº 2, p. 126 - 135, 2011.

FOGAÇA, J. R. V. **PET: um poliéster importante**. Disponível em: <<https://alunosonline.uol.com.br/quimica/pet-um-poliester-importante.html>>. Acesso em 06 jan. 2019.

FONSECA, T. G.; DE ALMEIDA, Y. M. B.; VINHAS, G. M. **Reciclagem Química do PET pós-consumo: Caracterização Estrutural do Ácido Tereftálico e Efeito da Hidrólise Alcalina em Baixa Temperatura**. Polímeros, São Carlos, Vol. 24, nº5, p. 567-571, out. 2014.

G1 PERNAMBUCO. **Canal do Arruda amanhece coberto por ‘tapete’ de lixo, na Zona Norte do Recife**. 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pe/pe-noticias/noticia/canal-do-arruda-amanhece-coberto-por-tapete-de-lixo-na-zona-norte-do-recife.ghtml>>. Acesso em 31 jan. 2018.

GOVERNO DO BRASIL. **Estudo técnico analisa a sustentabilidade na construção civil**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2014/11/estudo-tecnico-analisa-a-sustentabilidade-na-construcao-civil>>. Acesso em 18 nov. 2017.

GUERRA, A. S.; ROCHA, E. R. D.; OKABAYASHI, J. Y. **Estudo de viabilidade técnica para a reutilização do polietileno tereftalato (PET) residual em substituição ao agregado miúdo no concreto**. In: MIX SUSTENTÁVEL, nº3, 2017, Florianópolis. Anais da 7ª edição do Mix Sustentável da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017. p. 35-40.

ISAIA, G. C. A evolução do Concreto Estrutural. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 1v. cap. 1, p. 1.

JARDIM, R. R. **Estudo da viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo por agregado miúdo reciclado de PET em concretos convencionais**. Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

NETO, C. S. Agregados naturais, britados e artificiais para concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 1v. cap. 7, p. 237-246.

MACHADO, G. B. **Reciclagem de plásticos**. 2013. Disponível em: <www.portalesiduossolidos.com/reciclagem-de-plasticos-polimeros/>. Acesso em: 25 jan. 2018.

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

MODRO, N. L. R. et al. **Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET**. Revista Matéria, vol. 14, nº 1, pp. 725 - 736, 2009.

MONTEIRO, A. C. N. **Concreto poroso: dosagem e desempenho**. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

OLIVEIRA, F. et al. **Análise das propriedades mecânicas de concreto produzido com fibras de PET (polietileno tereftalato)**. In: ConGea, 2016. VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Campina Grande, 2016.

PEDROSO, F. L. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. Revista Concreto & Construções, nº 53, p. 14, 2009.

ROMÃO, W. et al. **PET: Uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem**. Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 19, nº 2, p. 121-132, 2009.

APÊNDICE A: CÁLCULOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMPONENTES DO CONCRETO

A.1 Definição da massa específica do cimento (NBR NM 23)

Primeira leitura realizada no frasco apenas com querosene (V_1) = 0,8 cm³.

Segunda leitura realizada no frasco contendo cimento (V_2) = 21 cm³.

Massa pesada para realizar o ensaio (m) = 60 g.

A massa específica (ρ), calculada de acordo com a equação $\rho = \frac{m}{V_2 - V_1}$, é equivalente a 2,97 g.cm⁻³ ou 2.970 kg.m⁻³.

A.2 Definição do módulo de finura do agregado miúdo (NBR NM 248)

Abertura Peneira (mm)	Amostra 1			Amostra 2		
	Massa retida (g)	%		Massa retida (g)	%	
		Retida	Acumulada		Retida	Acumulada
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	12,89	2,24	2,24	25,2	4,38	4,38
4,75	10,36	1,8	4,04	9,25	1,61	5,99
2,36	43,41	7,55	11,59	38,29	6,66	12,65
1,18	93,71	16,31	27,9	97,63	16,98	29,63
0,6	144,44	25,14	53,04	153,46	26,69	56,32
0,3	145,51	25,32	78,36	142,52	24,79	81,11
0,15	96,01	16,71	95,07	83,86	14,59	95,7
Fundo	28,28	4,93	100	24,65	4,3	100
Total	576,26	100		576,26	100	

Tabela 1 - Dados granulométricos da areia.

Fonte: Autor, 2018.

De acordo com a NBR NM 248 - *Determinação da composição granulométrica*, o cálculo do módulo de finura (MF) é feito através da soma das massas percentuais retidas acumuladas nas peneiras de série normal (P), dividida por 100, como representado abaixo na equação (1).

$$MF = \frac{\sum P}{100} \quad (1)$$

Desta forma, obteve-se que os módulos de finura das amostras um e dois equivaliam a 2,70 e 2,814, respectivamente, sendo então utilizado o valor obtido através da média aritmética dos módulos de finura encontrados, de 2,757.

A.3 Definição da massa específica solta do agregado miúdo

Massa do agregado juntamente ao recipiente (M_{total}) = 3.330 g;

Massa do recipiente (M_{tara}) = 50 g;

Volume do recipiente (V) = 2.000 cm³.

Desta forma, de acordo com a equação $\rho = \frac{M_{\text{total}} - M_{\text{tara}}}{V}$, ρ vale 1,64 g.cm⁻³ ou 1.640 kg.m⁻³.

A.4 Definição das massas específicas unitárias compactada e solta do agregado graúdo (NBR NM 45)

Massa do agregado juntamente ao recipiente (m_{ar}) = 3,3 kg;

Massa do recipiente (m_r) = 0,05 kg;

Volume do recipiente (V) = 0,002 m³.

Desta forma, de acordo com a equação $M_{\text{uc}} = \frac{M_{\text{ar}} - M_r}{V}$, a massa unitária compactada (M_{uc}) vale 1,625 g.cm⁻³ 1.625 kg.m⁻³.

Após realizar o mesmo procedimento para cálculo da massa específica unitária do agregado no estado solto, obteve-se igual resultado.

A.5 Definição da massa específica real (dos grãos) do agregado miúdo (NBR 6458)

- Umidade

Massa úmida do agregado no estado natural (m_h) = 189,48 g;

Massa seca do agregado (m_s) = 184,57 g;

A umidade do agregado no estado natural (h), obtida através da equação $h = \frac{M_h - M_s}{M_s}$, vale 0,0266 ou 2,66%.

- Massa específica real

Massa seca de solo arenoso (M_1) = 60,00 g;

Massa do picnômetro + água + solo (M_2) = 672,39 g;

Massa do picnômetro com água (M_3) = 637,55 g;

δT ($T = 27,4$ °C) = 0,99764 g.cm⁻³ (obtido através de tabela inserida na norma).

Utilizou-se a equação (2) a seguir para obtenção da massa específica real,

$$\delta s = \frac{M_1 \times \frac{100}{100+h}}{\left[M_1 \times \frac{100}{100+h} \right] + M_3 - M_2} \times \delta T \quad (2)$$

Assim, obteve-se que $\delta s = 2,37998$ g.cm⁻³ ou, aproximadamente, 2.380 kg.m⁻³.

A.6 Definição da composição granulométrica do PET aplicado nos traços (NBR NM 248)

O procedimento realizado na parte A.2 foi repetido aqui para o agregado de PET previamente passado na peneira 4,75 mm (Tabela 2). Assim, foi possível se desenvolver a curva granulométrica do agregado.

Abertura Peneira (mm)	Amostra PET 1			Amostra PET 2		
	Massa retida (g)	%		Massa retida (g)	%	
		Retida	Acumulada		Retida	Acumulada
6,3	0	0,00	0	0	0	0
4,75	0,015	7,69	7,69	0,025	10,42	10,42
2,36	0,15	76,92	84,62	0,17	70,83	81,25
1,18	0,03	15,38	100,00	0,04	16,67	97,92
0,6	0	0,00	100,00	0,005	2,08	100,00
0,3	0	0,00	100,00	0	0,00	100,00
0,15	0	0,00	100,00	0	0,00	100,00
Fundo	0	0,00	100,00	0	0,00	100,00
Total	0,195	100,00		0,24	100,00	

Tabela 2 - Dados granulométricos do PET.

Fonte: Autor, 2019.

A.7 Definição da massa específica real (dos grãos) dos flakes de PET (NBR 6458 adaptada)

- Umidade

Desejando não alterar propriedades físico-químicas do agregado de PET, optou-se por não o colocar em estufa e apenas secá-lo ao ar. A umidade obtida foi nula, pois não houve variação de massa nos períodos pré e pós secagem.

- Massa específica real

Massa seca de flake de PET (M_1) = 40,00 g;

Massa do picnômetro + água + flake (M_2) = 622,53 g;

Massa do picnômetro com água (M_3) = 608,36 g;

δT ($T = 28,0\text{ }^\circ\text{C}$) = $0,9963\text{ g.cm}^{-3}$.

Utilizando a equação (2), obtêm-se que $\delta s \approx 1,5428\text{ g.cm}^{-3}$ ou, aproximadamente, 1.543 kg.m^{-3} .

- Massa unitária de agregado de PET solto (ρ_{PET})

Massa seca de flake de PET (M_{PET}) = 0,24905 kg;

Massa do recipiente (m_r) = 0,01839 kg;

Volume do recipiente (V) = 0,0007 m³;

Desta forma, por meio da equação $\rho_{\text{PET}} = \frac{M_{\text{pet}} - M_r}{V}$, chega-se que $\rho_{\text{PET}} \approx 329,51\text{ kg.m}^{-3}$.

A.8 Definição da composição granulométrica da brita aplicada nos traços (NBR NM 248)

O procedimento adotado em A.2 foi repetido, podendo os dados registrados ser conferidos na Tabela 3. A partir deles construiu-se a curva granulométrica da brita em questão.

Abertura Peneira (mm)	Amostra Brita 1			Amostra Brita 2		
	Massa retida (g)	%		Massa retida (g)	%	
		Retida	Acumulada		Retida	Acumulada
19	0,025	0,50	0,50	0,005	0,15	0,15
12,5	2,14	42,71	43,21	1,35	39,24	39,39
9,5	1,99	39,72	82,93	1,24	36,05	75,44
6,3	0,77	15,37	98,30	0,625	18,17	93,60
4,75	0,065	1,30	99,60	0,135	3,92	97,53
2,36	0,02	0,40	100,00	0,075	2,18	99,71
1,18	0	0,00	100,00	0,005	0,15	99,85
0,6	0	0,00	100,00	0,005	0,15	100,00
0,3	0	0,00	100,00	0	0,00	100,00
0,15	0	0,00	100,00	0	0,00	100,00
Fundo	0	0,00	100,00	0	0,00	100,00
Total	5,010	100,00		3,440	100,00	

Tabela 3 - Dados granulométricos da brita.

Fonte: Autor, 2019.

APÊNDICE B: CÁLCULOS DE DEFINIÇÃO DO TRAÇO DO CONCRETO (MÉTODO ABCP)

B.1 Determinação da relação água/cimento

Pretendendo atingir uma resistência característica à compressão de projeto (f_{ck}) de 20 MPa e utilizando um desvio-padrão (S_d) de 4,0 MPa, obteve-se que, através da equação (3), a resistência média alcançada pelos corpos de prova aos 28 dias (f_{c28}) seria de 26,60 MPa. Por meio da curva de Abrams (Figura 19), a relação a/c vale 0,57.

$$f_{c28} = f_{ck} + 1,65 \times S_d \quad (3)$$

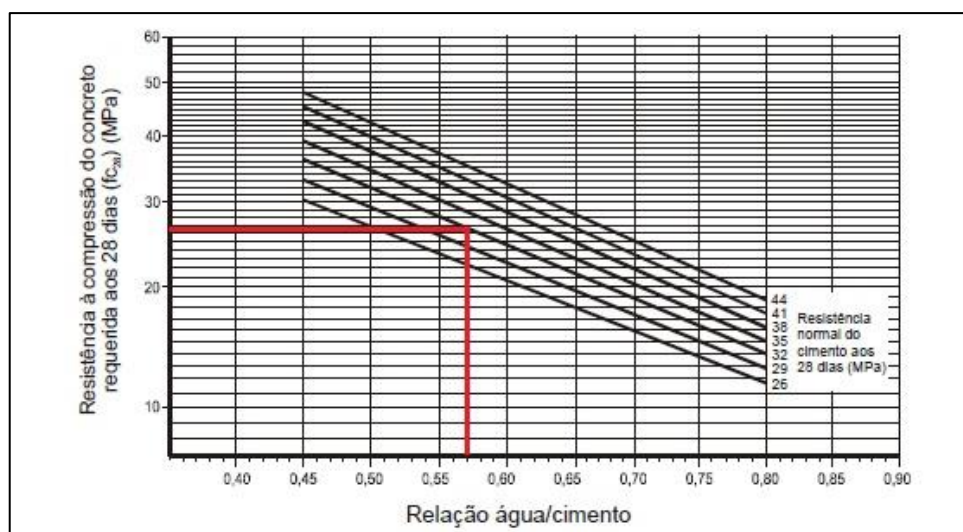


Figura 19 - Curva de Abrams.

Fonte: Assunção (modificada), 2002.

B.2 Determinação do consumo de materiais

- Água

De acordo com a Tabela 3, estimou-se um consumo aproximado d'água (C_a) de 200 L.m⁻³ de concreto levando em conta o diâmetro máximo característico da brita (19 mm) e o abatimento estimado (70 ± 10) mm.

Consumo de água aproximado (l/m ³)					
Abatimento (mm)	D _{máx} agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Tabela 3 - Estimativa do consumo de água em função do abatimento e diâmetro máximo do agregado graúdo para um metro cúbico de concreto.

Fonte: Assunção (modificada), 2002.

- Cimento

O consumo de cimento (C_c) pode ser encontrado por meio da relação $C_c = \frac{C_a}{a/c}$, que resulta em um consumo de cimento aproximado de 351 kg. m⁻³.

- Agregado graúdo

Segundo a Tabela 4, não há um valor específico para um MF de 2,757. Entretanto, por meio de interpolação, é possível chegar ao valor aproximado para o volume compactado seco (V_{cs}) de 0,675 m³.

MÓDULO DE FINURA DA AREIA	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO (Φ_{max})				
	9,5mm	19mm	25mm	32mm	38mm
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Tabela 4 - Volume compactado seco (V_{cs}) de agregado graúdo por metro cúbico de concreto.

Fonte: Assunção, 2002.

Portanto, através da relação $C_b = V_{cs} \times M_{uc}$, onde M_{uc} é o valor da massa unitária compactada (1.625 kg.m⁻³), obtida no apêndice A.4, tem-se que o consumo de brita (C_b) vale 1.097 kg.m⁻³.

- Agregado miúdo

De posse dos dados obtidos nas etapas anteriores, tem-se que o volume de areia (V_{ar}) é dado pela equação (4),

$$Var = 1 - \left[\frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{C_a}{\gamma_a} \right] \quad (4)$$

Ressalta-se que nos cálculos convencionou-se a massa específica real da brita (γ_b) em 2.700 Kg.m⁻³ e da água (γ_a) em 1.000 Kg.m⁻³, com base nos valores usuais adotados pela bibliografia. Assim, o volume de areia equivale a 0,2756 m³.

Desta forma, o consumo de areia (C_{ar}) para a produção de um metro cúbico de concreto é este valor multiplicado pela massa específica real do material (2.380 kg.m⁻³), obtida no apêndice A.5, ou seja, aproximadamente 656 kg.m⁻³.

B.3 Apresentação do traço

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland, o traço unitário (traço CP0) é obtido através da relação $\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_{ar}}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_a}{C_c}$, chegando-se a,

$$1: 1,87: 3,12: 0,57$$

Ressalta-se que o traço necessita de correção ao se considerar a umidade natural presente na areia (2,66%), resultando em,

$$1: 1,92: 3,12: 0,52$$

APÊNDICE C: CÁLCULOS DE TRAÇOS DE CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO EM VOLUME DO PET

Para encontrar o volume a ser substituído no traço, calcula-se o volume de areia (V_{ar}) no traço unitário em massa (TUM), dividindo-se a massa de areia seca no TUM (1,87 Kg) pela massa unitária do agregado solto, considerando-se os vazios (1.640 Kg.m^{-3}). O resultado do volume de areia (V_{ar}) é de, aproximadamente, $1,14 \times 10^{-3} \text{ m}^3$.

Logo, os volumes de areia a serem substituídos por PET correspondem a $5,70 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ (5% de V_{ar}) e $1,14 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ (10% de V_{ar}) para os traços CP5 e CP10, respectivamente.

Ao multiplicar tais valores pela massa unitária do PET solto ($329,51 \text{ kg.m}^{-3}$), obtém-se as massas aproximadas do material que será incorporado aos traços: 0,02 kg (CP5) e 0,04 kg (CP10). Desta forma,

$$\text{Traço CP5} \rightarrow 1 : 1,78 : 0,02 : 3,12 : 0,57$$

$$\text{Traço CP10} \rightarrow 1 : 1,68 : 0,04 : 3,12 : 0,57$$

Vale ressaltar que os traços necessitam de correção ao se considerar a umidade natural presente na areia (2,66%), resultando em, aproximadamente,

$$\text{Traço CP5} \rightarrow 1 : 1,83 : 0,02 : 3,12 : 0,52$$

$$\text{Traço CP10} \rightarrow 1 : 1,73 : 0,04 : 3,12 : 0,52$$

APÊNDICE D: CÁLCULOS PARA OBTENÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA (NBR 9778)

Com a moldagem de três corpos de prova cilíndricos de 10 cm × 20 cm (diâmetro × altura) para cada traço, foram definidos os valores de massa seca (M_s), massa imersa (M_i) e massa saturada (M_{sat}), em gramas, para que se calculasse uma média aritmética dos resultados de cada parâmetro avaliado (Tabela 5).

	CP0			CP5			CP10		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ms (g)	3.490	3.475	3.475	3.455	3.450	3.420	3.545	3.505	3.520
Mi (g)	2.096	2.080	2.093	2.050	2.046	2.031	2.101	2.076	2.079
Msat (g)	3.650	3.639	3.640	3.594	3.593	3.568	3.682	3.644	3.659

Tabela 5 - Massas secas, imersas e saturadas dos CP's.

Fonte: Autor, 2019.

A absorção de água é calculada através da expressão $\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100\%$, enquanto o índice de vazios por meio da expressão $\frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100\%$. Já a massa específica dos concretos é obtida pela expressão $\frac{M_s}{M_s - M_i}$, podendo os resultados de todos os parâmetros ser conferidos através da Tabela 6.

	CP0			CP5			CP10		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Abs. água (%)	4,58	4,72	4,75	4,02	4,14	4,33	3,86	3,97	3,95
Desvio Padrão (%)	0,09			0,16			0,06		
Í. vazios (%)	10,30	10,52	10,66	9,00	9,24	9,63	8,66	8,86	8,80
Desvio Padrão (%)	0,18			0,32			0,10		
M. espec. (g.cm-3)	2,50	2,49	2,51	2,46	2,46	2,46	2,45	2,45	2,44
Desvio Padrão (g.cm-3)	0,01			0			0,01		

Tabela 6 - Absorções de água, índices de vazios, massas específicas e respectivos desvios padrão.

Fonte: Autor, 2019.