

**RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL EM CONCRETOS ADITIVADOS COM
PET (POLITEREFTALADO DE ETILENO) EM SUBSTITUIÇÃO AOS AGREGADOS**
***AXIAL COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE PRODUCED WITH ADDITIVE
AND AGGREGATES REPLACED BY PET***

Cláudio Rodrigues Alves*¹
Douglas Bustamante da Silva**
Leandro Nunes Benedito***
Ana Flávia Ramos Cruz****

RESUMO

Nos dias atuais, estudar e desenvolver materiais cimentícios mais sustentáveis é tarefa primordial para o desenvolvimento sustentável, especialmente no que se refere à indústria da construção civil - uma das maiores geradoras de resíduos e consumidoras de recursos naturais. O presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência do uso de agregado de PET em substituição aos agregados em concretos de classe C30 (resistência de 30 MPa aos 28 dias de idade). Assim, foram desenvolvidas diferentes dosagens: CA (concreto aditivado sem uso de PET), CAPET 5, CAPET 10, CAPET 20 e CAPET50 (substituições em volume de 5%, 10%, 20% e 50%, respectivamente, dos agregados da mistura por agregados reciclados de PET). Foram desenvolvidos ensaios para avaliar a consistência e a resistência a compressão axial das dosagens. Como resultado, identificou-se que com o aumento das substituições, o material perde trabalhabilidade e resistência, de modo que os melhores resultados foram encontrados para as substituições de 5%. Nenhum dos produtos obtidos atingiu a resistência esperada para concretos estruturais, de forma que algumas variações de ensaio precisam ser revistas em pesquisas futuras. Constatou-se, porém, viabilidade de uso das dosagens ensaiadas nessa pesquisa para fins não estruturais.

Palavras-chave: Trabalhabilidade. Consistência. Resistência. Agregado Reciclado.

ABSTRACT

Nowadays, studying and developing more sustainable materials is a major task for sustainable development, especially with regard to the construction industry - one of the largest generators of waste and consumers of natural resources. The present work aims to evaluate the influence of the use of PET aggregate in concrete. This study replaced concrete aggregates with pet aggregates by 5%, 10%, 20% e 50%. This work developed different tests to evaluate the consistency and resistance to axial compression of the dosages. As a result, we can tell that with the increase in substitutions, the material loses workability and strength. Substitutions of 5% were the best results. None of the products resulted in good resistance for structural concretes,

*Rede de ensino Doctum - unidade Cataguases - e-mail - graduando em engenharia civil.

** Rede de ensino Doctum - unidade Cataguases - e-mail - graduando em engenharia civil.

*** Rede de ensino Doctum - unidade Cataguases - e-mail - graduando em engenharia civil.

**** Rede de ensino Doctum - unidade Cataguases - ana.cruz@engenharia.uff.br (orientadora do trabalho)

so some test variations need to be revised in future research. However, the material can be used in different ways do not involve the structural purpose.

Keywords: Workability. Consistency. Resistance. Recycled aggregate.

1 - Introdução

O concreto tradicional é constituído basicamente por cimento, agregados e água. O cimento é um material utilizado na construção civil e seu uso pode ser justificado por ele conferir uma série de características às misturas, como resistência, durabilidade e versatilidade. A indústria do cimento é um dos setores que vem crescendo nos últimos anos, movimentando bilhões de dólares em todo o mundo (THOMÉ, 2016). O cimento Portland é o tipo de cimento mais utilizado na construção civil, exercendo nas misturas cimentícias a função de aglomerante ou aglutinante. Os agregados empregados na fabricação do concreto podem ter origem natural ou artificial, sendo divididos em agregados miúdos e agregados graúdos.

Essas misturas cimentícias são empregadas com diversas funções - estruturais ou não. Porém, pode-se destacar que, com o passar dos anos, a busca pela melhoria de suas propriedades tornou-se impulsionadora de pesquisas na indústria da construção civil. Assim, estudos de dosagem e de desenvolvimento de novos materiais e serem incorporados nessas matrizes cimentícias a fim de melhorar ou modificar suas propriedades tornou-se tarefa essencial no desenvolvimento tecnológico do setor da construção civil. Nesse contexto, aditivos e adições tem sido estudados ao longo dos anos e garantiram maior desempenho e qualidade dessas misturas, fatores fundamentais para garantia de vantagem competitiva das empresas construtoras frente a suas concorrentes de mercado.

Porém, vale destacar que o desenvolvimento tecnológico que impulsionou a indústria da construção civil nos últimos, trouxe, com ele, graves prejuízos e impactos ambientais, como a extração de recursos naturais e a geração de resíduos. Quando se pensa em uso de matérias primas produzidas no mundo, entre 40% e 75% delas são consumidas na construção civil. Em relação aos recursos naturais, cerca de um terço de seu consumo mundial é feito pela indústria da construção civil (THOMÉ, 2016). Estima-se, ainda, que cerca de 5% das emissões de gás carbônicos do efeito estufa estejam relacionados às indústrias cimenteiras, no processo de fabricação do cimento (EFEITO, 2020).

Sabe-se ainda que as atividades para obtenção de agregados utilizados na construção civil como agregado miúdo são realizadas através da exploração de jazidas, podendo ser jazidas de rio, de cava ou de dunas e praias (AGOPYAN e JOHN, 2011). A atividade de extração deste recurso natural é uma das que mais contribuem para a modificação da superfície da terra, resultando num impacto negativo sobre a água, o solo, o subsolo e a paisagem do rio de uma forma geral (NOGUEIRA, 2016). Para exploração de agregados graúdos, vale destacar também as atividades de mineração, através da exploração de jazidas e detonação de rochas em pedreiras.

Portanto, é relevante pensar em variáveis para a redução da utilização deste e de outros recursos naturais não renováveis, amenizando com isso essa problemática (CANELLAS, 2005). Atualmente vem sendo estudada a utilização de materiais reciclados na construção civil, visto que a reciclagem é de fundamental importância para que a sociedade possa construir um planeta mais saudável, com menos poluição e mais sustentabilidade.

Desta maneira, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a resistência a compressão axial de um concreto classe C30 dosado com um aditivo polifuncional FK830 e com agregados substituídos parcialmente por agregado de PET (Politeraftalado de etileno).

Como objetivo secundário, o trabalho buscou avaliar, também, a consistência e a trabalhabilidade das dosagens.

Vale destacar que esta pesquisa é uma continuação da pesquisa de concretos dosados com diferentes tipos de aditivos, na qual o FK830, embora seja um aditivo polifuncional, proporcionou ganhos de resistência ao concreto de referência sem aditivo (ALVES *et al.*, 2020).

A hipótese inicial da pesquisa é de que haveria perda de resistência das misturas com as substituições parciais dos agregados naturais por agregados de PET, em relação às dosagens de referência, sem substituição com agregado de PET. A segunda hipótese era de que, havendo perda de resistência, ela poderia ser compensada com o uso do aditivo FK830, e, assim, ser obtido um concreto com resistência a compressão de 30 MPa ou superior, compatível à classe C30, para a qual foi dosado.

No presente trabalho, optou-se por manter o uso do aditivo para compensar possíveis perdas de resistência geradas pela substituição dos agregados naturais por agregados de PET.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela lei federal nº 12305 (BRASIL, 2010) prevê que sejam priorizadas atividades que não gerem resíduos. Se isso não for possível, que haja redução na geração, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos urbanos.

Conforme visto em Agopyan e John (2011), devido ao aumento da população, houve um crescimento descontrolado na utilização e descarte de PET's no Brasil nos últimos anos. A maioria dessas garrafas são descartadas em terrenos baldios, rios e oceanos, causando contaminação e contribuindo com o entupimento de bueiros e galerias, ocasionando enchentes. Nos dias atuais, reciclar tem sido considerado uma atitude de suma importância para redução dos impactos no meio ambiente.

Para Silva (2011), o aprimoramento dos métodos mencionados e o desenvolvimento de medidas mais racionais são capazes de contribuir com a redução de resíduos na construção civil, além de gerar uma nova possibilidade de utilizar diversos materiais de forma prática e sustentável.

Assim, desenvolver pesquisas voltadas para a redução da exploração de recursos naturais - agregados naturais - e reciclagem de resíduos sólidos advindos de outras indústrias, como os resíduos de PET, é tarefa primordial para o desenvolvimento sustentável de um país.

2 - Referencial Teórico

2.1 - Materiais constituintes do concreto

- **Aglomerante**

Na construção Civil, existem tipos de cimentos cujas funções variam de acordo com suas propriedades e aplicações. A classificação dos cimentos quanto a seus constituintes é apresentada a seguir, conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018).

CPI - Cimento Portland comum;

CPI-S - Cimento Portland comum com adição;

CP II-E - Cimento Portland composto com escória;

CP II-Z - Cimento Portland composto com pozolana;

CP II-F – Cimento Portland composto com fíler

CP III – Cimento Portland de alto-forno;

CP IV - Cimento Portland pozolânico;

CP V - ARI - cimento Portland de alta resistência inicial.

O CP I é um tipo de cimento que utiliza pouco ou nenhum acréscimo de demais componentes. Sua classe é de 25 MPa, que representa o mínimo de resistência a compressão aos 28 dias. No CP I pode haver até 5% de escória granulada de alto forno. Já no CPI-S é adicionado no de 6 a 10% de material carbonático. O CP II-E é usado quando há necessidade de que as estruturas liberem calor de modo lento ou que possam ser atacadas por sulfatos. O CP II-E é constituído de 51% a 94% de clínquer e sulfatos de cálcio, de 6% à 34% de escória granulada de alto forno e de 0 a 15% de material carbonático. Já o CP II-Z é constituído de 71 a 94% de clínquer e sulfatos de cálcio, 0 a 15% de material carbonático, havendo presença de material pozolânico, de 6 a 14%. Existe ainda o CP II-F, sem escória ou material pozolânico, havendo apenas material carbonático entre 11 e 25%.

O CP III, cimento Portland de alto forno, é um aglomerante obtido pela mistura homogênea de clínquer e escória granulada de alto forno, moídos em conjunto ou separadamente. A concentração de escória granulada de alto forno deve estar compreendida entre 35% e 75% da massa total de aglomerante. A porcentagem de clínquer é de 25 a 65%, podendo, ainda, haver material carbonático até 10%. Suas classes são 25, 32 ou 40 MPa.

Em relação ao cimento Portland CP IV, apresenta maior impermeabilidade, durabilidade e resistência à compressão à longo prazo. É geralmente utilizado para grandes volumes de concreto devido ao baixo calor de hidratação e em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos devido a sua baixa porosidade. Apresenta material pozolânico de 15 a 50% e tem classe 25, 32 ou 40 MPa.

Por fim, o CPV ARI é o cimento de alta resistência inicial, que deve atingir já no primeiro dia de idade resistência de 14 MPa. Possui de 90 a 100% de clínquer e sulfato de cálcio, podendo haver adição de até 10% de material carbonático.

- **Agregados**

Os agregados são os materiais granulares, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades adequadas às obras de engenharia, em especial aquelas que envolvam a fabricação de concretos e argamassas (BARBOSA, 2017). Os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, duráveis, estáveis, serem limpos e não interferirem no endurecimento e nas reações de hidratação do cimento, além de não comprometerem a proteção contra corrosão da armadura (AGREGADOS, 2020).

Barbosa (2017) afirma que esses materiais podem ter diferentes classificações. Segundo a sua origem, os agregados podem ser naturais, britados, artificiais ou reciclados. Os agregados naturais são aqueles derivados de rochas que existem na crosta terrestre e que, para sua utilização, só é preciso que passem por um processo de lavagem. É o caso da areia de rio, pedregulho, entre outros. Os agregados britados são aqueles derivados do processo de fragmentação de rocha. Existem ainda os agregados artificiais, produzidos por processos industriais, como a argila expandida e a vermiculita expandida. Existem ainda os agregados reciclados, que são materiais granulares obtidos a partir da reciclagem de rejeitos ou subprodutos da produção industrial, mineração ou construção e demolição da construção civil. É o caso da escória de alto forno que pode ser utilizada como agregado, dos resíduos de construção e demolição (RCD) e dos resíduos de PET, objeto de estudo desta pesquisa.

Os agregados podem, ainda, ter uma classificação voltada para sua densidade, podendo ser: leves (como os agregados expandidos de argila), normais (como a brita) ou pesados (como a magnetita). Os agregados leves são aqueles com densidade inferior a 2000 kg/m^3 . São geralmente empregados na produção de concretos leves. Vale destacar, ainda, que os concretos por eles produzidos que sejam muito porosos são indicados para concretos com fins de isolamento e não para fins estruturais. Os agregados normais tem densidade entre 2000 kg/m^3 e 3000 kg/m^3 . Os agregados pesados são empregados na blindagem de radiação nuclear (ABNT NBR 9935, 2011; BARBOSA, 2017).

Barbosa (2017) aponta que os concretos estruturais devem ter resistência a compressão mínima de 17 MPa aos 28 dias. A NBR 8953 (ABNT, 2015) traz informação semelhante e é, ainda, mais restritiva. Concretos estruturais são aqueles de classe C20 (resistência a compressão axial mínima aos 28 dias de 20 MPa) ou superior. A norma informa, ainda, que concretos de resistência inferior a 20 MPa não são estruturais e caso sejam utilizados devem ter seu desempenho atendido conforme a NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto (ABNT, 2014) e NBR 12655 - Concreto de cimento Portland: Preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimentos (ABNT, 2015).

Pode ser feita também a classificação dos agregados quanto à sua granulometria, que é a classificação mais empregada. Para isso, é importante conhecer o conjunto de peneiras sucessivas da NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2010). Suas aberturas estão especificadas em milímetros (mm):

- Série normal: 75; 37,5; 19; 9,5; 4,75; 2,36; 1,18; 0,6; 0,3; 0,15
- Série intermediária: 63; 50; 31,5; 25; 12,5; 6,3.

Segundo a NBR 7211 - Agregados para concreto: especificação (ABNT, 2009), define-se agregado miúdo como o agregado formado por grãos que passam pela peneira ABNT 4,75 mm. A NBR 9935 (ABNT, 2011) destaca, ainda, que o agregado miúdo fica retido na peneira de 0,15 mm. Já o agregado graúdo é o agregado com grãos que passam na peneira com abertura de malha 75 mm e ficam retidos na peneira de abertura 4,75 mm (ABNT NBR 7211, 2009). Ressalvas a essa regra são feitas nas tabelas 2 e 6 da referida norma, que estipula os limites inferiores e superiores da distribuição granulométrica desses agregados, em ensaio de granulometria realizado conforme a NBR NM 248 - Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003).

Em relação à nomenclatura desses agregados quanto à granulometria, existem algumas variações comerciais em função da antiga classificação da NBR 7211 (ABNT, 1983), que foi substituída pela versão 2009 e corrigida em 2019. A antiga versão da norma caracterizava os agregados miúdos como aqueles retidos na peneira de 0,075 mm e passantes na peneira de 4,8 mm. Já os agregados graúdos era classificados como aqueles retidos na peneira de 4,8 mm e passantes na peneira de 152 mm. Os

agregados miúdos eram subdivididos em quatro zonas: zona 1 (muito fina); zona 2 (fina); zona 3 (média); zona 4 (grossa). No que se refere aos agregados graúdos, sua classificação granulométrica envolvia diferentes graduações: brita 0, 1, 2, 3, 4 e 5.

Nesse sentido, em sua nova versão, a NBR 7211 (ABNT, 2009) também estipula faixas de variação dos agregados graúdos, conforme tabela 6 desta norma.

- Primeira zona granulométrica: 4,75 mm a 12,5 mm - chamado também de pedrisco (ABNT NBR 9935, 2011);
- Segunda zona granulométrica: 9,5 mm a 25 mm;
- Terceira zona granulométrica: 19 a 31,5 mm;
- Quarta zona granulométrica: 25 a 50 mm;
- Quinta zona granulométrica: 37,5 a 75 mm.

Além das classificações acima, a NBR 9935 (ABNT, 2011) define, ainda, pó de pedra como o material granular resultante da britagem de rocha que passa na peneira de malha 6,3 mm. O pó de pedra é um resíduo proveniente do processo da extração de brita, ficando acumulado em abundância nos pátios das pedreiras.

Dentre as principais propriedades de agregados miúdos verificadas através de ensaios estão: massa específica e massa específica aparente; massa unitária; absorção de água; inchamento; teor de partículas leves e umidade superficial. Em agregados graúdos, pode-se avaliar propriedades físicas e mecânicas, como: massa específica absoluta e aparente e absorção de água; ciclagem; teor de partículas leves; umidade total; módulo de deformação elástico e coeficiente de Poisson; resistência ao esmagamento; desgaste por abrasão; resistência à compressão da rocha (ABNT NBR 7211, 2009).

- **Aditivos e adições**

Nas matrizes cimentícias, aditivos e adições vem sendo empregados nos últimos anos, a fim de modificar uma ou mais de suas propriedades. Na linguagem técnica, os termos são, ainda, confundidos. Pode-se dizer que adições podem ser consideradas como qualquer material de origem mineral, capaz de somar ou substituir o cimento em matrizes cimentíficas, alterando suas características químicas ou físicas. É o caso do metacaulim, da sílica ativa, cinza volante, entre outros (MEHTA e

MONTEIRO, 1994). O Quadro 01 destaca as classificações das adições minerais para concreto estrutural.

Quadro 01: Classificação das adições minerais para concreto estrutural

Classificação	Adições Minerais Utilizadas Em Concretos Para Fins Estruturais
Cimentantes	Escória Granulada De Alto-Forno
Cimentantes e Pozolânicos	Cinza Volante Com Alto Teor De Cálcio.
Superpozolanas	Sílica Ativa, Metacaulim, Cinza De Casca De Arroz Predominantemente Amorfa.
Pozolanas Comuns	Cinza Volante Com Baixo Teor De Cálcio, Argilas Calcizadas, Cinzas Vulcânicas.
Pozolanas Pouco Reativas	Escórias De Alto-Forno Resfriadas Lentamente, Cinza De Casca De Arroz Predominantemente Cristalina.
Filler	Calcário, Pó De Quartzo, Pó De Pedra.

Fonte: adaptado de Mehta e Monteiro (1994)

A utilização de certos tipos de adições, assim como de agregados reciclados, reforça o pensamento de sustentabilidade, uma vez que busca o desenvolvimento tecnológico do concreto a partir de resíduos. É o caso das escórias de alto forno e cinzas volantes, que passam a ter outras aplicações além do descarte no meio ambiente.

Os aditivos por sua vez são materiais de origem química adicionados em pequenas quantidades nas matrizes cimentícias, sendo possível a alteração das propriedades de concretos e argamassas no estado fresco e no estado endurecido. O uso de aditivos interfere diretamente na perda ou ganho de resistência mecânica em um concreto, além de afetar sua consistência e trabalhabilidade, sua permeabilidade, dentre outras propriedades do concreto.

Os principais aditivos disponíveis no mercado são os aditivos redutores de água ou plastificantes, os aditivos superplastificantes, os hiperplastificantes, os aditivos aceleradores ou retardadores de pega, aditivos incorporadores de ar, aditivos polifuncionais/multifuncionais, entre outros, como visto na NBR 11768 – Aditivos para concreto de cimento Portland (ABNT, 2011).

A NBR 11768 (ABNT, 2011) classifica os aditivos polifuncionais como aqueles aditivos plastificantes que permitem maior dosagem que os plastificantes convencionais. Assim, os polifuncionais conferem maior trabalhabilidade e/ou redução de água. Já os superplastificantes tem maior efeito de redução de água e/ou ganho de trabalhabilidade que os plastificantes de modo geral. São, assim, considerados de alta eficiência.

Os aditivos incorporadores de ar permitem que o concreto fique resistente a baixas temperaturas e a ataques químicos provocados por sais de degelo. Já os modificadores de pega são aqueles utilizados para acelerar ou retardar as reações de hidratação do cimento.

- **Fibras**

Mehta e Monteiro (1994) destacam que outro material muito empregado nas matrizes cimentícias são as fibras. Elas podem ser de diversos tipos, como: fibras de aço, de polipropileno (microfibras de monofilamentos ou fibriladas, e macro fibras poliméricas), fibras de vidro, de carbono, de náilon, madeira, sisal, entre outras. As fibras atuam como ponte de transferência de tensão nas fissuras, e podem: aumentar a resistência à tração e a ductilidade dos concretos, melhorar o comportamento no estado fresco e no processo de endurecimento. Podem ser utilizadas para o controle de fissuração plástica em pavimentos, para reduzir ou interromper o processo de fissuras, para reforço do concreto endurecido, entre outras funções.

3 - Metodologia

Esta pesquisa contou com o desenvolvimento de ensaios de resistência à compressão axial e de consistência, para avaliação da resistência mecânica e trabalhabilidade das misturas de concreto dosados com agregado de PET em substituição aos agregados miúdo e graúdo empregados.

Assim, primeiramente, busca-se destacar os materiais empregados e, posteriormente, as dosagens utilizadas na pesquisa.

3.1 - Materiais empregados

Para dosagem das misturas e moldagem dos corpos de prova, foram empregados nas matrizes cimentícias os seguintes materiais:

- Aglomerante - cimento Portland CPII - E, classe 32 MPa;
- Agregado miúdo - areia natural do Rio Pomba, de Cataguases, Minas Gerais;
- Pó de pedra - agregado britado de origem gnáissica, obtido de uma pedreira em Cataguases, Minas Gerais;
- Pedrisco - agregado graúdo britado da primeira zona granulométrica 4,75/12,5 obtido de uma pedreira em Cataguases, Minas Gerais;
- Brita 9,5/25 - agregado graúdo britado da segunda zona granulométrica 9,5/25 obtida de uma pedreira em Cataguases, Minas Gerais.
- Aditivo polifuncional FK-830, cuja viabilidade de uso foi verificado na mesquisa anterior de Alves *et al.* (2020).
- Agregado reciclado de PET, para substituição dos demais agregados em diferentes proporções.

A Figura 01 ilustra o agregado de PET utilizado neste pesquisa. Ele foi obtido a partir de garrafa PET triturada em triturador mecânico na cidade de Cataguases (MG). Destaca-se que foram identificadas limitações do equipamento em relação à granulometria do produto final. Não foi possível obter um produto que atenda à uma ampla faixa granulométrica. Assim, ao ser passado no jogo de peneiras, identificou-se que o material é 100% passante na peneira de 4,75 mm e 100% retido na peneira de 2,36 mm.

Figura 01: Agregado reciclado de PET



Fonte: Os autores (2020)

3.2 - Determinação dos traços

O traço de referência dessa mistura (CA) foi obtido de uma concreteira (concreteira A) na cidade de Cataguases (MG), para dosagem de um concreto C30 (resistência de 30 MPa aos 28 dias de idade). Os materiais empregados na dosagem foram os mesmos empregados nesta pesquisa. O Quadro 02 indica as dosagens para o traço de referência, considerando uma betonada em betoneira estacionária de 150l.

Quadro 02: Traço de referência CA

Concreto de referência - CA	
Material	Massa (g)
Aglomerante	5.365
Agregado miúdo	11.290
Pó de pedra	1.220
Pedrisco	6.025
Brita 9,5/25	8.995
Aditivo FK830	25.40
Água	2.490

Fonte: adaptado de uma concreteira A na cidade de Cataguases (2020)

Para as substituições dos agregados por agregado reciclado de PET, foi verificado um problema em relação às dimensões dos materiais, uma vez que o agregado de PET não possui as mesmas faixas granulométricas da areia e pó de pedra utilizados nesta pesquisa. Constatou-se que, embora possa ser classificado como agregado miúdo (100% do material é passante na peneira de 4,75 mm), o agregado de PET tem granulometria muito uniforme, se comparado à areia e ao pó de pedra, além de possuir maiores dimensões. Assim, baseando-se na pesquisa de Modro e Oliveira (2009), optou-se por substituir em conjunto os agregados. Ou seja, o agregado de PET foi utilizado para substituir uma mistura de agregado miúdo, pó de pedra e pedrisco (da zona granulométrica 4,75/12,5). A brita da zona granulométrica 9,5/25 não foi substituída, por se distanciar muito da granulometria do agregado reciclado de PET.

A partir do traço de referência, foram retiradas massas de agregados correspondentes a 5%, 10%, 20% e 50% das massas iniciais (do traço de referência) de cada um desses agregados. No momento de substituir os agregados pelo agregado reciclado de PET, optou-se por fazer as substituições em volume, uma vez que o agregado de PET tem densidade muito diferente dos agregados utilizados nesta pesquisa, o que inviabilizaria as substituições em massa. Essa consideração também foi feita nos trabalhos de Modro e Oliveira (2009), Jardim (2016) e Gorges *et al.* (2019).

Assim, nos traços com uso do agregado de PET em substituição aos agregados miúdo, pó de pedra e pedrisco, foram empregadas as seguintes massas de materiais nas betonadas, conforme Quadro 03. As siglas utilizadas para descrever as dosagens são:

- CA - concreto aditivado de referência, sem PET;
- CAPET5 - concreto aditivado com 5% de substituição de agregados por agregado de PET;
- CAPET10 - concreto aditivado com 10% de substituição de agregados por agregado de PET;
- CAPET20 - concreto aditivado com 20% de substituição de agregados por agregado de PET;
- CAPET50 - concreto aditivado com 50% de substituição de agregados por agregado de PET.

Quadro 03: Traços com substituição

Concreto com substituição de 5% - CAPET5		Concreto com substituição de 10% - CAPET10	
Material	Massa (g)	Material	Massa (g)
Aglomerante	5.365	Aglomerante	5.365
Agregado miúdo	10.726	Agregado miúdo	10.161
Pó de pedra	1.159	Pó de pedra	1.098
Pedrisco	5.724	Pedrisco	5.423
Brita 9,5/25	8.995	Brita 9,5/25	8.995
Aditivo FK830	25.40	Aditivo FK830	25.40
Água	2.490	Água	2.490
Agregado de PET: 5% do volume do material retirado		Agregado de PET: 10% do volume do material retirado	
Concreto com substituição de 20% - CAPET20		Concreto com substituição de 50% - CAPET50	
Material	Massa (g)	Material	Massa (g)
Aglomerante	5.365	Aglomerante	5.365
Agregado miúdo	9.032	Agregado miúdo	5.645
Pó de pedra	976	Pó de pedra	610
Pedrisco	4.820	Pedrisco	3.013
Brita 9,5/25	8.995	Brita 9,5/25	8.995
Aditivo FK830	25.40	Aditivo FK830	25.40
Água	2.490	Água	2.490
Agregado de PET: 20% do volume do material retirado		Agregado de PET: 50% do volume do material retirado	

Fonte: Os autores (2020)

3.3 - Preparo, moldagem dos corpos de prova, cura e ensaios realizados

- **Preparo**

Para cada traço dos Quadro 02 e 03, foram moldados 05 corpos de prova no dia 17/10/2020. A mistura dos materiais em betoneira estacionária foi feita segundo as recomendações da NBR 12655 (ABNT, 2015) - Concreto de cimento Portland: Preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento.

A norma recomenda que para betoneiras estacionárias o procedimento de preparo da mistura siga as recomendações do fabricante. Assim, inicialmente buscou-se pesar todos os materiais e verificar o volume de agregado de PET empregado em cada mistura. Tendo pesado os materiais em balança de precisão de 0,1 g, foi feita a mistura do aditivo na água de amassamento. Posteriormente, ligou-se a betoneira estacionária, previamente umedecida, e foi realizada a mistura dos materiais aos poucos e na seguinte ordem: britas, 1/3 do volume da mistura de água e aditivo, cimento, 1/3 do volume da mistura de água e aditivo, areia pó de pedra e pet, restante da água. O procedimento de mistura foi feito até o material ficar homogêneo e sem ultrapassar 5 minutos. A Figura 02 ilustra o momento de inclusão do agregado de PET na betoneira.

Figura 02: Agregado reciclado de PET inserido na mistura



- **Moldagem dos corpos de prova**

Antes de realizar a moldagem dos corpos de prova, foi feita a verificação do abatimento do tronco de cone (*slump test*) para avaliação da consistência dos concretos, conforme previsto na NBR NM 67 (ABNT, 1998). A Figura 03 ilustra o ensaio de abatimento do tronco de cone. As recomendações normativas foram observadas, de modo que o ensaio foi realizado com preenchimento do molde em três camadas, havendo compactação de cada camada com 25 golpes.

Figura 03: Verificação do abatimento do tronco de cone



Fonte: Os autores (2020)

A NBR 5738 (ABNT, 2015) especifica o procedimento de moldagem dos corpos de prova de concreto. Os corpos de prova de concreto utilizados são cilíndricos de dimensões 10 cm x 20 cm. Vale destacar algumas recomendações normativas, como a dimensão da base do corpo de prova deve ser no mínimo três vezes superior à dimensão máxima do agregado utilizado. Os moldes devem ser revestidos por lubrificante ou óleo em sua face interna. Nos corpos de prova cilíndricos foi feito adensamento manual em duas camadas, conferidos 12 golpes por camada. Observou-se, ainda, a recomendação normativa de rasamento do topo dos corpos de prova com a colher de pedreiro.

Após a moldagem, os corpos de prova foram identificados e armazenados em local protegido de intempéries, para evitar a perda de água do material. Eles ficaram 24h no processo de cura inicial. Findado o período de cura inicial, os corpos de prova foram desmoldados e novamente identificados. Foram, então, submersos em tanque

de imersão de solução saturada de hidróxido de cálcio até atingirem 28 dias de idade. Buscou-se manter a temperatura em $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

- **Ensaio de resistência à compressão axial - execução, resultados e interpretação dos dados**

Terminado o período de cura dos corpos de prova, eles puderam ser retirados do tanque e ensaiados. Para realização do ensaio de resistência a compressão axial, é necessário que seja feita preparação das bases com retificação ou capeamento com material de até 3 mm de espessura em cada base (ABNT NBR 5738, 2015). Por falta de equipamento para retificação, esta etapa não foi realizada na pesquisa para nenhum corpo de prova.

Os ensaios de resistência a compressão axial foram feitos no dia 14/11/2020 com ruptura em prensa manual (conforme Figura 04). Foram atendidos os critérios da NBR 5739 - Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2015).

Figura 04: Ruptura dos corpos de prova



Fonte: Os autores (2020)

Para avaliação estatística do desempenho e confiabilidade dos resultados dos ensaios, foi utilizado o anexo B da NBR 5739 (ABNT, 2016). Para esta avaliação, é

recomendado que a amostra (ou seja, cada dosagem) tenha dez ou mais exemplares e que cada exemplar tenha no mínimo 2 corpos de prova. Para cada exemplar, calcula-se a amplitude dos resultados (A_i), considerando o número de exemplares n e o número de corpos de prova por exemplar. Assim, o desvio padrão é calculado para a amostra, conforme anexo B da NBR 5739 (ABNT, 2016).

Neste trabalho, para cada amostra (cada traço ensaiado), foi desenvolvido apenas um exemplar, com 5 corpos de prova cada um. Deste modo, para cada traço o desvio padrão foi dado pela equação 1, considerando A a amplitude dos resultados e 2,326 o coeficiente de ponderação utilizado quando são moldados 5 corpos de prova por exemplar.

$$S_e = A/2,326 \quad (1)$$

Assim, o coeficiente de variação dentro do ensaio (C_{ve}) pode ser calculado a partir de S_e e da resistência média (f_{cm}) obtida nos exemplares. Como nesta pesquisa foi desenvolvido apenas um exemplar por amostra, f_{cm} foi dada a partir das médias dos resultados dos corpos de prova.

Deste modo, a equação 2 expressa o coeficiente de variação dentro do ensaio (C_{ve}):

$$C_{ve} = [S_e/f_{cm}] \times 100 \quad (2)$$

A avaliação estatística quanto à dispersão dos resultados é dada atribuindo-se diferentes níveis, como descrito a seguir:

- Nível 1: Excelente ($C_{ve} \leq 3,0$);
- Nível 2: Muito bom ($3 \leq C_{ve} \leq 4,0$);
- Nível 3: Bom ($4,0 \leq C_{ve} \leq 5,0$);
- Nível 4: Razoável ($5,0 \leq C_{ve} \leq 6,0$);
- Nível 5: Deficiente ($C_{ve} \geq 6,0$).

4 - Resultados

4.1 - Apresentação dos resultados

De um modo geral, pode-se indicar no Quadro 04 os resultados obtidos de abatimento e as médias de resistência à compressão axial obtidas para cada dosagem.

Quadro 04: Resultados encontrados

Identificação	Slump Test (mm)	Média de resistência a compressão axial (MPa)
CA	152	16,59
CAPET5	158	16,92
CAPET10	80	13,10
CAPET20	140	10,99
CAPET50	34	6,17

Fonte: Os autores (2020)

Para o concreto de referência, foi possível identificar os resultados encontrados no Gráfico 01. Os resultados variaram entre 13,19 MPa e 18,24 MPa, com uma amplitude de 5,05 Mpa, desvio padrão (Se) de 2,17 Mpa, resistência média (fcm) de 16,59 MPa e coeficiente de variação dentro do ensaio (Cve) de 13% (indicando deficiência no procedimento de ensaio).

Gráfico 01: Resultados encontrados para o traço de referência CA



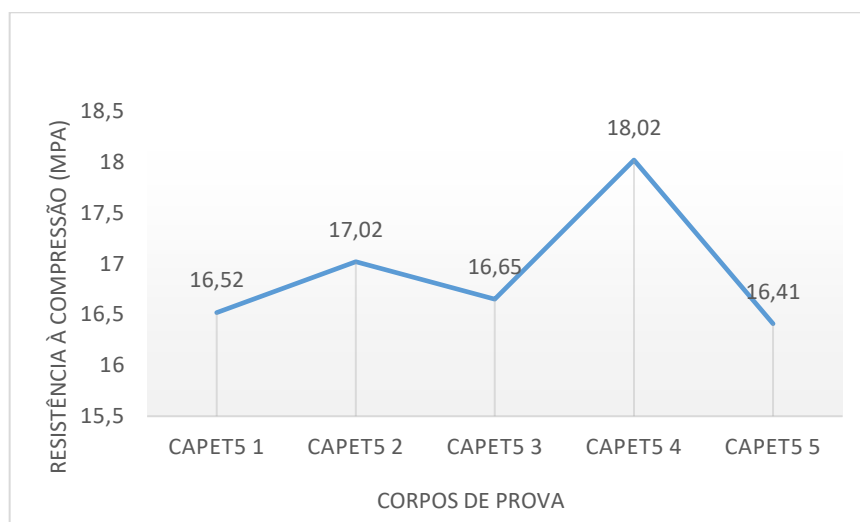
Fonte: Os autores (2020)

Para os traços com substituição dos agregados por agregado reciclado de PET, foi feito o mesmo procedimento de análise de dados. Os Gráficos 02, 03, 04 e 05

ilustram os resultados encontrados para os traços com substituições de 5%, 10%, 20% e 50%, respectivamente. A partir dos dados do Gráfico 02, observou-se um coeficiente de variação dentro do ensaio (Cve) de 4,1% (considerado bom) para as dosagens com 5% de substituição. Nas dosagens com 10% de substituição (Gráfico 03), verificou-se um Cve de 12%, também deficiente. Para as substituições de 20% (Gráfico 04) o Cve obtido foi de 10% (deficiente) e para as dosagens com 50% de substituição (Gráfico 05) o Cve foi também de 4,1%, considerado bom.

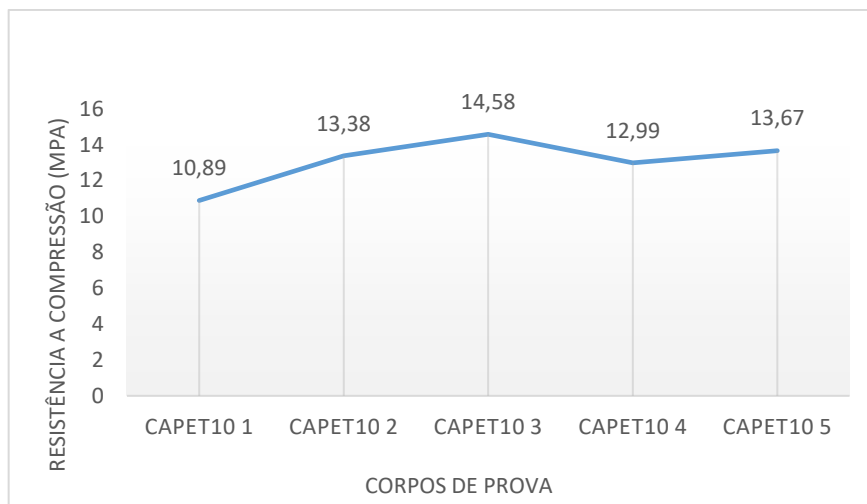
Vale destacar que esses resultados não retratam o desempenho do agregado de PET na mistura como bom ou deficiente, mas sim a confiabilidade dos resultados encontrados.

Gráfico 02: Resultados encontrados para o traço com 5% de substituição



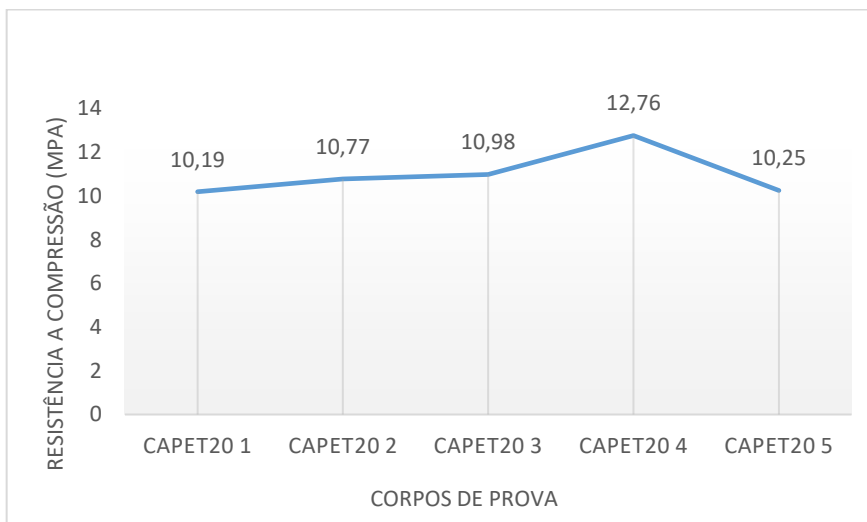
Fonte: Os autores (2020)

Gráfico 03: Resultados encontrados para o traço com 10% de substituição



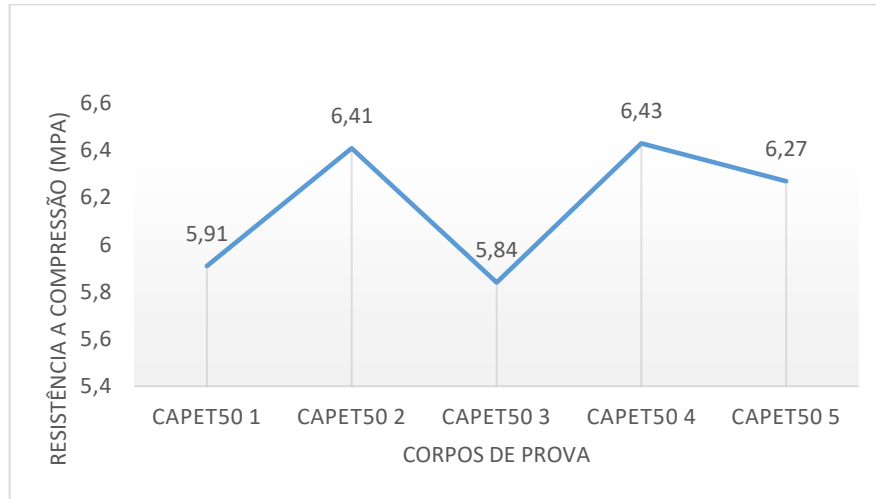
Fonte: Os autores (2020)

Gráfico 04: Resultados encontrados para o traço com 20% de substituição



Fonte: Os autores (2020)

Gráfico 05: Resultados encontrados para o traço com 50% de substituição



Fonte: Os autores (2020)

4.2 - Discussões

Analisando os resultados obtidos, percebe-se pelo Quadro 04 que os concretos com agregado de PET tendem a perder consistência e trabalhabilidade. Esse resultado está de acordo com os resultados da literatura e pode consultado na pesquisa de Modro e Oliveira (2009). Assim, para que se tenha um bom desempenho dessas misturas, é indicado o uso de aditivos polifuncionais, plastificantes ou superplastificantes, que possam contribuir na melhoria desta propriedade, como foi feito neste trabalho. Observa-se ainda que o CAPET10 teve um valor bastante divergente dos demais. Isso aconteceu devido ao fato de haver erro de execução do ensaio no momento de retirada do molde, de modo que a avaliação do abatimento do tronco de cone ficou comprometida (Figura 05).

Figura 05: Erros de execução do ensaio no CAPET10



Fonte: Os autores (2020)

Em relação aos resultados obtidos de resistência à compressão axial algumas considerações podem ser feitas:

a) Todas as dosagens tiveram resultados bastante inferiores ao resultado esperado, uma vez que o traço foi desenvolvido para resistência de 30 MPa. Identificando os resultados obtidos, verifica-se que mesmo o concreto de referência aditivado não obteve a resistência esperada de 30 MPa. Inicialmente, acreditou-se que a justificativa para esse fato estaria vinculada à erros de moldagem dos corpos de prova. Porém, uma vez que os resultados obtidos para dosagem de 5% de substituições e 50% de substituições foram satisfatórios, constatou-se que os ensaios podem ser considerados bem executados. Acredita-se que o principal motivo para a baixa resistência está relacionada à falta de retificação dos topos e das bases dos corpos de prova, além da falta de experiência dos operados no rompimentos dos corpos de prova em prensa manual.

b) Existe, através do Quadro 04, um indicativo de padrão de comportamento da resistência do concreto com agregado reciclado de PET: observa-se que a resistência à compressão do concreto diminui quando o percentual de substituição aumenta.

O resultado está de acordo com os resultados encontrados por Modro e Oliveira (2009), Canellas (2005) e Almeida *et al.* (2004). Modro e Oliveira (2009) explicam que o material de PET tem menor interação química com a matriz cimentícia e é um material com maior porosidade residual. Vale destacar também a menor resistência mecânica do agregado de PET em relação aos agregados minerais, que são muito mais resistentes mecanicamente.

c) Em relação à confiabilidade dos resultados e coeficiente de variações obtidos, observa-se que os resultados obtidos para o concreto de referência e os concretos com substituição de 10 e 20% tiveram grande dispersão de resultados e podem ser considerados deficientes para uma análise mais criteriosa. Os resultados obtidos para as substituições de 5% e 50% tiveram uma boa confiabilidade e a partir deles algumas conclusões podem ser tiradas, como a possibilidade de equiparação de propriedades de um concreto com 5% de substituição dos agregados por agregado de PET em relação ao de referência. Outra conclusão à qual se chega é que as dosagens com 50% de substituição são inviáveis tecnicamente, uma vez que atingiram níveis de resistência bastante baixos, frente às demais.

d) Por não terem atingido a resistência mínima de 20 MPa para concretos estruturais (ABNT NBR 6118, 2014), os materiais desenvolvidos nesta pesquisa, a princípio, não são indicados para uso como concreto estrutural. Porém, visto que mesmo o concreto de referência, produzido apenas com aditivo, dosado para resistir a pelo menos 30 MPa, teve uma faixa de resistência média abaixo de 17 MPa, pode-se dizer que houve erros de manuseio da prensa, perdas de resistência por falta de retificação do topo e base dos corpos de prova, entre outras variações, que contribuíram para os resultados obtidos, considerados insatisfatórios. Assim, não foi possível concluir sobre a viabilidade dessas misturas com agregado de PET para fins estruturais. Há um indicativo de que é possível obter dosagens indicadas para uso estrutural, especialmente do CAPET5, que muito se assemelha ao comportamento do concreto de referência CA. Para o CAPET5 foi possível obter resistências de até 18,02 MPa, valor já considerado satisfatório para fins estruturais, de acordo com Barbosa (2017). Gorges *et al.* (2019) também encontraram um comportamento semelhante entre concretos de referência (sem substituição) e concretos dosados com substituição de até 10% de seus agregados por agregados de PET. Modro e Oliveira (2009) encontraram em sua pesquisa viabilidade técnica para uso não estrutural das dosagens obtidas com substituição de agregados por PET. Entre esses usos, os autores destacam: alvenaria de fechamento interna, capas de lajes pré-moldadas ou nervuradas, material de enchimento, entre outros.

5 - Considerações finais

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, conclui-se que todas as dosagens tiveram resistências inferiores à resistência esperada de 30 MPa, mesmo a dosagem de referência, o que pode ser justificado por diversos fatores, como falta de retificação do topo e base dos corpos de prova e erros no manuseio da prensa.

Por conta disso, os resultados obtidos foram abaixo de 20 MPa, valor mínimo indicado para concretos estruturais segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014). Assim, nas condições de ensaio realizadas nesta pesquisa, as dosagens obtidas não tiveram bom desempenho para fins estruturais. Foram, assim, mais indicadas para fins não estruturais, como material de enchimento, capas de lajes e uso em alvenaria de fechamento interno.

Porém, não é possível afirmar que essas dosagens não podem ser empregadas para fins estruturais. Se corrigidas as variações e irregularidades apontadas nesta pesquisa em estudos futuros, acredita-se ser possível obter concretos com substituição dos agregados por agregado reciclado de PET com resistências superiores a 20 MPa, na dosagem do CAPET5, com substituição de 5%, que foi a dosagem que obteve melhor resultado e teve comportamento semelhante ao concreto de referência.

Por fim, pode-se dizer que foi possível observar um padrão de comportamento compatível com os resultados encontrados na literatura: quanto maior o teor de substituições, menor a resistência à compressão das misturas e menor sua trabalhabilidade. Assim, o uso de aditivos que garantam ganhos de trabalhabilidade é altamente recomendado, como foi feito nesta pesquisa (com emprego de aditivo polifuncional FK830).

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de mais exemplares por amostra, para maior base de dados estatísticos. Recomenda-se também a retificação dos corpos de prova e uso de prensa digital para rompimento dos corpos de prova. Outra possibilidade a ser avaliada em pesquisas futuras é a trituração do agregado de PET em outro equipamento, até ser obtida a granulometria ótima dos agregados miúdos, de modo que areias e agregado de PET tenham a mesma distribuição granulométrica e o agregado de PET possa ser utilizado para substituir somente a areia ou a areia e o pó de pedra.

Referências

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. *O desafio da sustentabilidade na construção*. São Paulo: Blucher, 2011.

AGREGADOS *para concreto: o que são e para que servem?* Tecnosil Br, 2020. Disponível em: < <https://www.tecnosilbr.com.br/agregados-para-concreto-o-que-sao-e-para-que-servem/> > Acesso em: 30 de novembro de 2020.

ALMEIDA, M.; JUNIOR, M.; SONCIM, S.; JUNIOR, G. *Uso de areia de PET na fabricação de concretos*. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia e Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. Livro de Resumos, pp. 39, Santa Catarina, Outubro, 2004.

ALVES, C.; CRUZ, A. F.; SILVA, D.; BENEDITO, L. *A influência do uso de aditivos na resistência a compressão de concretos classe C30*. In: Anais do I Simpósio Internacional de Engenharias UniDoctum; 16 - 20 nov 2020; Teófilo Otoni, MG, Brasil; 2020. p. 1-5.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 – *Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova*. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 – *Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502 – *Rochas e solos*. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – *Projeto de estruturas de concreto - procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211 – *Agregados para concreto - especificação*. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953 – *Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9935 – *Agregados - terminologia*. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768 – *Aditivos para concreto de cimento Portland*. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655 – *Concreto de cimento Portland - preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento*. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697 – *Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52 – *Agregado miúdo: determinação das massas específicas e massas específicas aparentes*. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53 – *Agregado miúdo: determinação das massas específicas e massas específicas aparentes*. Rio de Janeiro, 2003.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM ISO 3310-1 – *Peneiras de ensaios - requisitos técnicos e verificação - Parte 1*. Rio de Janeiro, 2010.

BARBOSA, M. *Materiais de Construção Civil*. Juiz de Fora, 2017 (Apostila).

CANELLAS, S.S. *Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassas*, Dissertação M.Sc., PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

EFEITO *estufa e aquecimento global*. Ministério Do Meio Ambiente, 2020. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/informma/item/195-efeito-estufa-e-aquecimento-global>>. Acesso em 21 de Março de 2020.

GORGES, G.; PERES, G.; GABRIEL, P. CASOLA, M.; CÂMARA, E. *Substituição parcial do agregado miúdo natural por cerâmica vermelha e polietileno tereftalado (PET) em concreto*. In: Anais do Congresso Técnico e Científico da Engenharia e da Agronomia; 17 - 19 set 2019; Palmas, TO, Brasil; 2019. p. 1-5.

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

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

MODRO, N.; OLIVEIRA, A. *Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET*. Revista Matéria, v. 14, n.1, pp. 725-736, 2009.

THOMÉ, Brenda Bressan. *Desperdício na construção civil: impactos no meio ambiente*. Sienge Plataforma, 2016. Disponível em: <<https://www.sienge.com.br/blog/desperdicio-na-construcao-civil-impactos-no-meio-ambiente/>> Acesso em: 30 de novembro de 2020.