

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ANDRIELLEN PAZ FERNANDES

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA NATURAL
POR AGREGADO RECICLADO DE PET NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E
DE RETRAÇÃO POR SECAGEM DE CONCRETOS CONVENCIONAIS**

**Alegrete
2017**

ANDRIELLEN PAZ FERNANDES

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA NATURAL
POR AGREGADO RECICLADO DE PET NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E
DE RETRAÇÃO POR SECAGEM DE CONCRETOS CONVENCIONAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Simone Dornelles
Venquiaruto

**Alegrete
2017**

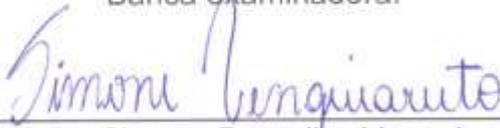
ANDRIELLEN PAZ FERNANDES

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA NATURAL
POR AGREGADO RECICLADO DE PET NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E
DE RETRAÇÃO POR SECAGEM DE CONCRETOS CONVENCIONAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 30 de novembro de
2017.

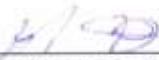
Banca examinadora:



Prof. Dr. Simone Dornelles Venquiaruto
Orientadora
UNIPAMPA



Prof. Dr. Ederir Marangon
UNIPAMPA



Eng. Me. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira
UNIPAMPA

Dedico este trabalho àqueles que mais amo: Meu marido Wagner e minha filha Helena pelo amor, paciência e cuidado que tiveram comigo.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiro a Deus por ter me dado força e serenidade nos momentos que mais precisei e por ter tantas pessoas especiais para a agradecer nesse momento; Ao meu marido, meu amor, meu amigo, ele que é a pessoa que mais acredita em mim e que esteve do meu lado em todos os momentos durante esta trajetória. Que me deu apoio, força, motivação e amor, para que eu sempre tivesse firmeza para continuar esse caminho, não existem palavras que expressem o quanto agradeço por tê-lo em minha vida.

À minha filha Helena, que cresceu no meio dos meus livros e estudos, e que com seu jeitinho meigo e amoroso só de olhar nos meus olhos me transmitia toda a paz e tranquilidade que eu precisei para persistir no meu sonho, que apesar de ser pequena, teve a maturidade que eu necessitei para manter-me firme no meu caminho.

Aos meus pais que sempre me amaram e me disseram que eu poderia ser o que eu quisesse, que alcançaria o que desejava, agradeço por todas as vezes que me mostraram que não fazemos só o que é bom na vida e assim me ensinaram que temos que enfrentar os caminhos que nos parecem difíceis e assim ter persistência.

Aos meus sogros que foram meus olhos e meus abraços à minha filha enquanto eu estudava e que também sempre me apoiaram e me auxiliaram;

À minha amiga Gabi que sempre me incentivou e muitas vezes com suas comidinhas tornou meu dia mais fácil;

À minha orientadora, Prof. Simone que sempre me ajudou em todos os momentos que necessitei para o desenvolvimento desta pesquisa, com seu olhar mais tranquilo e um sorriso para acalmar;

Ao Engenheiro Marcelo e Técnica do laboratório Raquel que ajudaram muito, sempre com muita disposição e alegria para que eu pudesse realizar este trabalho;

Por fim a todos que de alguma maneira torceram por mim.

“Ser profundamente amado por alguém nos dá força; amar alguém profundamente nos dá coragem”.

Lao-Tsé

RESUMO

A indústria da construção civil é responsável pela geração de resíduos e pelo consumo considerável de recursos naturais não renováveis. Atualmente, na busca da minimização dos impactos ambientais gerados pela indústria da construção, existe uma preocupação mundial em buscar materiais alternativos ou reciclados que possam substituir de maneira eficiente os materiais convencionais utilizados para a produção de concretos e argamassas. Este trabalho de pesquisa teve como objetivo analisar a viabilidade da utilização de agregado reciclado de PET em substituição parcial ao agregado miúdo natural nas propriedades mecânicas e de retração por secagem de concretos convencionais. As propriedades mecânicas dos concretos produzidos foram avaliadas através dos ensaios de resistência à compressão axial e de resistência à tração na flexão. As propriedades de durabilidade foram avaliadas ao longo do tempo através do ensaio de retração por secagem. Foram estudados dois teores de substituição de agregado reciclado de PET, 10% e 15%, também foi feito um concreto para que fosse utilizado como referência. Matematicamente os resultados de resistência à compressão e à tração não foram influenciados pelos diferentes teores, e sim somente a variável idade teve significância. Os resultados de retração mostraram que os concretos não apresentaram grandes variações. Assim concluiu-se que a substituição de agregado miúdo natural por agregado reciclado de PET é viável.

Palavras-Chave: Concreto, agregados reciclados de PET, areia de PET.

ABSTRACT

Building Industry generates residues and consumes massive amounts of non-renewable natural resources. Currently, aiming to minimize environmental impacts, there is worldwide concernment to find alternative materials or even recycled materials which might efficiently replace the standard materials in concrete and mortar production. This research seeks to analyze the feasibility to use aggregates of recycled PET in partial supersede of natural fine aggregate with the same mechanical properties and drying shrinkage of regular concrete. Mechanical properties of the experimental concrete will be evaluated through tests of axial compression and tensile bending strength. Properties of durability will be evaluated through time with drying shrinkage test. The study used two percentages of substitution of standard aggregate for PET aggregate, 10% and 15%, that were compared with the performance of reference concrete (100% natural fine aggregate). Mathematically the results of the tests of axial compression and tensile bending strength were not affected by different percentage, but only aging was a significant factor. Drying shrinkage tests show that concrete does not show significant variation. Thus, it can be concluded that the partial substitution of natural fine aggregate for PET aggregate is feasible.

Keywords: concrete, PET recycled aggregates, PET sand

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produtos resultantes do processo de revalorização do PET, (A) pó de PET e (B) flake de PET	26
Figura 2 - Fluxograma do programa experimental	39
Figura 3 – Determinação do abatimento, (A) concreto de referência, (B) concreto com 10% de PET e (C) concreto com 15% de PET	42
Figura 4 – Corpo de prova cilíndrico, (A) corpo de prova não retificado, (B) seção retificada de corpo de prova com 15% de PET	43
Figura 5 – Ensaio de compressão simples, (A) corpo de prova posicionado na prensa, (B) corpo de prova rompido	44
Figura 6 - Dimensões do corpo de prova	44
Figura 7 - Demarcação do corpo de prova	45
Figura 8 – Corpo de prova posicionado na prensa.....	45
Figura 9 – Corpo de prova após rompimento	46
Figura 10 – Corpo de prova rompido após ensaio, (A) corpo de prova rompido no terço médio, (B).....	46
Figura 11 – Pinos metálicos inseridos no corpo de prova	47
Figura 12 – Ensaio de retração, (A) equipamento de medição, (B) corpo de prova posicionado.	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Disposição de resíduos sólidos no Brasil por tipo de destinação (t/dia) ..21	
Gráfico 2 – Curva granulométrica agregado miúdo natural e agregado reciclado de PET	33
Gráfico 3 – Curva granulométrica da mistura com 10% de PET	35
Gráfico 4 – Curva granulométrica da mistura com 15% de PET	35
Gráfico 5 – Módulo de finura dos agregados miúdos	36
Gráfico 6 – Curva granulométrica agregado graúdo	38
Gráfico 7 – Resultado dos ensaios de compressão nos concretos estudados	50
Gráfico 8 – Resistência média à compressão nas idades de controle	52
Gráfico 9 – Resultado dos ensaios de tração na flexão nos concretos estudados....	53
Gráfico 10 – Resistência média à tração na flexão nas idades de controle	55
Gráfico 11 – Variação da retração no concreto de referência	56
Gráfico 12 – Variação da retração no concreto com 10% de PET	56
Gráfico 13 – Variação da retração no concreto com 15% de PET	57
Gráfico 14 – Resultados de retração por secagem nos concretos investigados.	58
Gráfico 15 – Resultados de retração na 32 ^a semana	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Características dos resíduos sólidos e da sua gestão	20
Quadro 2 - Características dos plásticos mais encontrados nos resíduos sólidos	22
Quadro 3 - Pesquisas realizadas com materiais reciclados	27
Quadro 4 - Ensaio e Normas utilizados para a caracterização dos agregados	32
Quadro 5 - Ensaio e Normas utilizados para a caracterização dos agregados.	37
Quadro 6 – Dimensões e formatos corpos de prova	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentual de utilização dos principais plásticos	23
Tabela 2 - Percentual de coleta dos principais plásticos	24
Tabela 3 - Consumo final do PET	25
Tabela 4 – Exigências físicas, mecânicas e químicas do cimento.	31
Tabela 5 – Caracterização física do agregado miúdo natural	32
Tabela 6 – Caracterização física do agregado reciclado de PET	32
Tabela 7 – Composição granulométrica da mistura com 10% de PET	34
Tabela 8 – Composição granulométrica da mistura com 15% de PET	34
Tabela 9 – Caracterização física do agregado graúdo	37
Tabela 10 – Traço unitário utilizado na pesquisa.	40
Tabela 11 – Número de corpos de prova e idade de realização de ensaios	40
Tabela 12 – Trabalhabilidade dos diferentes traços	42
Tabela 13 – Temperatura e umidade relativa do ar nos dias de execução dos concretos	42
Tabela 14 – Resultado da massa específica dos concretos	49
Tabela 15 – Resultados comparativos entre as resistências dos concretos estudados	51
Tabela 16 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de compressão axial.....	52
Tabela 17 – Resultados comparativos entre as resistências dos concretos estudados	54
Tabela 18 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de tração na flexão	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção

ASTM – American Society for Testing and Materials

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem

CP IV 32 – Cimento Portland Pozolânico

CP's – Corpos de Prova

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PEBD – Polietileno de Baixa Densidade

PET – Politereftalato de Etileno.

PP – Polipropileno

PS - Poliestireno

PVC - Poli Cloreto de Vinila

RCC – Resíduo de Construção Civil

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivos.....	17
1.1.1 Objetivo geral.....	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
1.2 Justificativa.....	17
1.3 Estrutura do trabalho.....	18
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1 Gestão de resíduos.....	19
2.1.1 Principais tipos de resíduos plásticos.....	21
2.1.2 Politereftalato de etileno – PET.....	23
2.1.3 Reciclagem de Polímeros.....	24
2.1.4 Reciclagem do PET e a possibilidade de reutilização para a produção de concretos.....	25
2.2 Concreto.....	26
2.2.1 Concreto com agregados reciclados.....	26
2.2.2 Concreto com agregado reciclado de PET.....	28
3 METODOLOGIA.....	30
3.1 Definição das variáveis de resposta.....	30
3.2 Caracterização dos materiais.....	31
3.2.1 Cimento.....	31
3.2.2 Agregado Miúdo.....	31
3.2.3 Agregado graúdo.....	37
3.3 Programa Experimental.....	38
3.3.1 Definição do traço.....	39
3.3.2 Produção dos concretos.....	40
3.3.3 Moldagem e cura dos Corpos de Prova.....	41

3.3.4 Ensaios	41
3.3.4.1 Abatimento do tronco de cone	41
3.3.4.2 Resistência à compressão	43
3.3.4.3 Resistência à tração na flexão	44
3.3.4.4 Retração por secagem.....	47
4 RESULTADOS	49
4.1 Massa específica do concreto	49
4.2 Resistência à compressão.....	49
4.3 Resistência à tração na flexão	53
4.4 Retração por secagem.....	55
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
5.1 Conclusões	60
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	61
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia há uma grande preocupação com o meio ambiente, pois com o aumento da população e o avanço tecnológico, os recursos naturais estão sendo bastante afetados, ocorrendo a sua utilização de forma desmedida e incorreta. Apesar de os recursos parecerem abundantes e intermináveis, eles são escassos e, se sua utilização continuar de forma excessiva, poderão se esgotar.

A utilização dos recursos naturais é de extrema importância para o homem, desde os tempos mais antigos se fez uso da natureza para a sobrevivência e sustento, mas com o passar do tempo, foi se aprendendo a cultivar e acumular o necessário. Ao mesmo tempo, com o desenvolvimento tecnológico, cada vez mais foram extraídos recursos naturais para serem utilizados na construção civil, nas indústrias, na geração de energia e também como combustível.

Convém citar que alguns recursos não são renováveis, pois não existe a possibilidade de eles se reporem na natureza. De outra forma, existem recursos que são renováveis, que são restaurados por processos naturais, mas a população precisa ter a consciência que essa velocidade de renovação leva mais tempo do que a de consumo.

Nesse contexto, nota-se que nos padrões de produção e de consumo dos dias atuais, há muito mais exploração do que o necessário, havendo muito desperdício e geração de resíduos sólidos. São muitos materiais que são substituídos com frequência, muitas embalagens, muitos aparelhos eletrônicos que facilmente se tornam ultrapassados e que são depositados de maneira inadequada na natureza. Ao mesmo tempo, para que haja a produção destes bens, há muita extração de recursos da natureza, muita utilização de energia e de recursos minerais.

Conforme Gouveia (2012), com o desenvolvimento econômico, o crescimento da população e o desenvolvimento tecnológico, há mudanças no modo de vida e de consumo da população, com isso, há aumento e diversidade na produção de resíduos sólidos, fazendo com que haja maior quantidade destes resíduos na natureza e também com que muitos sejam agentes altamente poluidores. Boa parte destes resíduos não possui destinação adequada, são depositados em locais a céu aberto chamados de lixões, podendo comprometer a qualidade do solo, da água

através da produção do chorume, líquido proveniente de sua decomposição, e do ar, devido à liberação de gases tóxicos.

A melhor alternativa para o descarte destes resíduos são aterros sanitários, pois é a alternativa com maior redução dos impactos ambientais, com várias vantagens, pois o solo onde são implantados possui impermeabilização para que não ocorra contato entre os líquidos provenientes de sua decomposição, possui lagoas de decomposição para que a matéria orgânica desses líquidos seja biodegradada e apresenta subdivisões para colocação de lixo, para que ocorra a coleta dos materiais para reciclagem (SANTOS et al., 2006). Reciclagem é o resultado do processo que os materiais passam a ser coletados, separados e processados até se tornarem matéria prima para sua reutilização, sendo uma maneira de diminuir a quantidade de lixo no ambiente (ALENCAR, 2005).

De acordo com a Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), há a geração de 79,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, destes, 90,8% são coletados, sendo que 58,7% destes são encaminhados para aterros sanitários. Com isso, tem-se 42,58 milhões de toneladas de resíduos sólidos que possuem disposição final ambientalmente adequada (ABRELPE, 2015). Segundo a Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET), no ano de 2015 foram recicladas 274.000 toneladas de PET (Politereftalato de Etileno) no Brasil, e isto corresponde a 51% do PET fabricado (ABIPET, 2015).

A preocupação com o uso consciente dos materiais, com o menor desperdício e o reaproveitamento de resíduos é uma ideia que deve estar presente em todos os setores. O setor da Construção Civil, nos últimos anos, está cada vez mais atento à Sustentabilidade Ambiental, com a utilização de materiais alternativos para que haja menos impacto ambiental. A Construção Civil afeta o meio ambiente de várias maneiras, tanto com a extração de recursos não renováveis ou com a utilização de aterros para depósito de resíduos.

Segundo Canellas (2005), a areia é um recurso natural amplamente utilizado na construção civil, porém, há danos causados pela sua extração da natureza, nos quais podem ser: assoreamento e erosão dos leitos dos rios, diminuição da pressão sobre os lençóis subterrâneos e diminuição da função de filtro que a areia tem para as águas subterrâneas.

Diante o exposto, torna-se relevante que sejam encontradas formas para a diminuição da utilização da areia natural como agregado miúdo na construção civil,

sendo necessária a sua substituição por materiais alternativos. Convém dizer que já há pesquisas (PIETROBELLI, 2010); (CANELLAS, 2005); (JARDIM, 2016) que estudaram a viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de PET, no qual é o tema desta pesquisa. Estes estudos mostraram que é viável a substituição, porém, ficou indicado que ainda se necessita de mais estudos e conhecimento sobre este assunto.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade da utilização de agregado miúdo reciclado de PET em substituição parcial ao agregado miúdo natural através do estudo das propriedades mecânicas e de retração por secagem de concretos convencionais.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Verificar a influência da substituição parcial de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de PET na trabalhabilidade dos concretos pelo método do abatimento do tronco de cone;
- Investigar a influência da substituição parcial de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de PET na resistência à compressão axial de concretos convencionais;
- Estudar a influência da substituição parcial de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de PET na resistência à tração na flexão de concretos convencionais;
- Analisar a influência da substituição parcial de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de PET na retração por secagem de concretos convencionais.

1.2 Justificativa

Segundo a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil (ANEPAC) em 2014, no Brasil, foram consumidos 741 milhões de toneladas de agregados, sendo que estes foram utilizados em construção de

casas, estradas, metrô, edifícios e pavimentação urbana. A areia é o agregado mais utilizado, sendo consumidos 439 milhões de toneladas, correspondente a 2,2 toneladas per capita (ANEPAC, 2015). Em função do exposto, é de suma importância que o setor da construção civil adquira uma maior conscientização em relação à necessidade de preservação do meio ambiente, seja minimizando a geração de resíduos, seja incorporando materiais alternativos na produção de concretos e argamassas, para a preservação de jazidas naturais.

O tema do trabalho foi escolhido devido à necessidade de a Construção Civil buscar novos materiais que possam ser utilizados em substituição aos materiais convencionais, sem prejuízos para as argamassas e concretos convencionais. Já é visto que os agregados naturais destinados às obras de engenharia estão se tornando cada vez mais escassos, por serem recursos não renováveis. Nesse sentido, estudos sobre a utilização de materiais alternativos, como a areia de PET, por exemplo, contribuiria para mostrar a diminuição da extração e do consumo de recursos naturais não renováveis, caso a sua viabilidade fosse comprovada. Outra vantagem do uso da areia de PET seria a redução do impacto ambiental, uma vez que esse material é depositado em grande escala no meio ambiente, apesar de, no Brasil, o índice de reciclagem ser significativo.

Em função do exposto, o estudo da viabilidade de substituição do agregado miúdo natural por um agregado miúdo alternativo, justifica o tema dessa pesquisa.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em três capítulos, O primeiro capítulo apresenta introdução sobre o tema, o objetivo geral, objetivos específicos e a justificativa do estudo. No segundo capítulo consta a fundamentação teórica essencial para nortear os procedimentos necessários para que os objetivos sejam atingidos. O terceiro capítulo apresenta a metodologia que será utilizada para realização do trabalho e o cronograma com a programação do experimento.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Gestão de resíduos

A norma NBR 10004 (ABNT 2004) define como resíduos nos estados sólido e semissólido todo material que resultar de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Também ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água.

Os resíduos são classificados em duas classes, Classe I e Classe II. Os resíduos perigosos, que apresentam periculosidade ou inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade são classificados como Classe I, aqueles que não são perigosos, Classe II. Os resíduos que se enquadram na Classe II ainda podem ser subdivididos em A e B. Os resíduos pertencentes à Classe IIA são materiais não inertes, e podem apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Os resíduos pertencentes à Classe IIB são materiais inertes, quando em contato com água destilada ou deionizada, não tem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações maiores aos padrões de potabilidade de água, exceto aspectos como cor, turbidez, dureza e sabor.

Conforme a ABRELPE (2015), a geração per capita de resíduos sólidos no Brasil no ano de 2015 foi de 1,071 kg/hab/dia, havendo aumento percentual de 0,8%, se comparado com o ano de 2014, que foi de 1,062 kg/hab/dia, totalizando 79,9 milhões de toneladas. Já a coleta de resíduos sólidos per capita em 2015 teve um aumento também, sendo de 0,972 kg/hab/dia, aumento de 0,9 %, pois no ano de 2014 foram coletados 0,963 kg/hab/dia. Com esses dados percebe-se que além dos resíduos que são coletados e depositados de maneira incorreta em locais impróprios, há o percentual que não é coletado, sendo depositados diretamente em locais não adequados.

No ano de 2010 foi criada a Lei Federal 12.305/2010, na qual instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispendo sobre princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes que norteiam a gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, tornando-os responsabilidade de quem gera o resíduo e do poder público. Esta lei tem como alguns objetivos integrar os catadores de materiais

reutilizáveis e recicláveis em ações que envolvam a responsabilidade compartilhada pelos resíduos, envolvendo em não gerar, reduzir, reutilizar, reciclar e tratar os resíduos sólidos e dar uma disposição final ambientalmente adequada para os rejeitos. Ademais, também visa articular as diferentes esferas do poder público com o setor empresarial, para que haja cooperação técnica e financeira (BRASIL 2010).

Com a criação da Lei 12.305/2010 as administrações públicas municipais ficam obrigadas a construir aterros sanitários e acabar com os lixões a céu aberto. Também devem implantar coleta seletiva e dar prioridade para os catadores, os fabricantes, distribuidores e comerciantes ficam responsáveis por suas embalagens de papel, plástico, vidro e metálicas; e o setor de construção civil fica responsável pelos resíduos de construção e demolição (BRASIL 2010).

O Quadro 1 mostra os tipos de resíduos, as fontes geradoras e destinação.

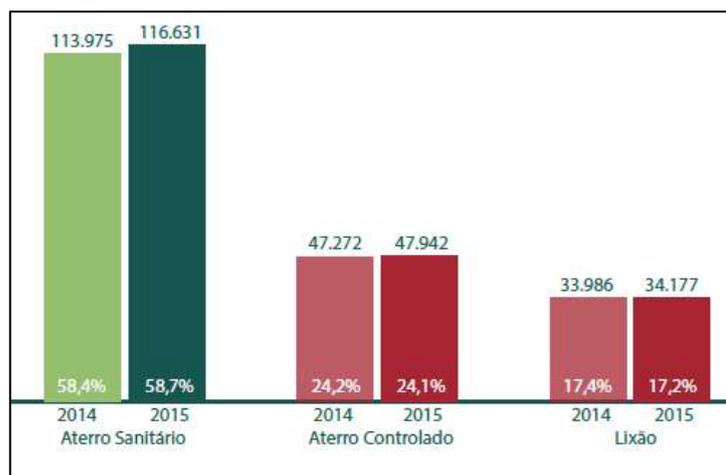
Quadro 1- Características dos resíduos sólidos e da sua gestão

Resíduos sólidos	Fonte geradora	Resíduo produzido	Responsável
Domiciliar	Residências, empresas, escolas	Sobras de alimentos, lixo de banheiro, embalagens de papel, vidro, plástico, isopor, longa, pilhas, eletrônicos	Município
Comercial (pequeno gerador)	Comércios, bares, restaurantes, empresas	Embalagens de papel e plástico, sobras de alimentos e outros	Definido pelo município
Comercial (grande gerador)	Comércios, bares, restaurantes, empresas	Embalagens de papel e plástico, sobras de alimentos e outros	Gerador
Público	Varrição, poda	Poeira, folhas, papéis e outros	Município
Serviço de saúde	Hospitais, clínicas, consultórios, laboratórios	Grupo A – biológicos: sangue, tecidos, vísceras, resíduos de análises clínicas Grupo B – químicos: lâmpadas medicamentos vencidos e interditados, termômetros, objetos cortantes Grupo C – radioativos Grupo D – comuns; não contaminados; papéis, plásticos, vidros, embalagens e outros	Município e gerador
Industrial	Industrial	Cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, escórias e outros	Gerador
Portos Aeroportos Terminais	Portos, aeroportos, terminais	Resíduos sépticos, sobras de alimentos, material de higiene e asseio pessoal e outros	Gerador
Agrícola	Agricultura	Embalagens de agrotóxicos, pneus e óleos usados, embalagens de medicamentos veterinários, plásticos	Gerador
Construção civil (RCC)	Obras, reformas residências e comerciais	Madeira, cimento, blocos, pregos, gesso, tinta, latas, cerâmicas, pedra, areia e outros	Gerador e Município

Fonte: Adaptado de Jacobi e Besen (2011, p. 138).

Segundo a ABRELPE (2015), 40,29% dos municípios brasileiros destinam seus resíduos sólidos para aterros sanitários, 31,85% para aterros controlados e 27,86 % para lixões a céu aberto. O Gráfico 1 apresenta a disposição de resíduos sólidos no Brasil por tipo de destinação (t/dia).

Gráfico 1 - Disposição de resíduos sólidos no Brasil por tipo de destinação (t/dia)



Fonte: ABRELPE (2015, p. 23)

Somente 31,9% dos resíduos gerados são materiais secos e recicláveis, e a sua composição é formada por: 7,52% vidro; 9,09% metal; 41,07% papel e papelão; 42,32% plástico (CEMPRE, 2015).

2.1.1 Principais tipos de resíduos plásticos

Os resíduos plásticos possuem grande valor como matéria-prima e podem ser transformados em energia e em outros materiais poliméricos no processo de reciclagem, felizmente, já que a maior parte dos artigos plásticos que são vendidos, como embalagens e outros objetos com pouca durabilidade tornam-se resíduos em menos de um ano, alguns desses bens são descartados em um único uso (AL-SALEM; LETTIERI; BAEYENS, 2010, p. 103-129 apud OLIVEIRA, 2012).

Grandes quantidades de resíduos plásticos, alguns com dimensões bem pequenas devido sua incompleta degradação, se acumulam no meio ambiente, causando danos ambientais. Os danos podem ser devido à liberação de toxinas para o meio ambiente, a ingestão por animais causando a morte destes, e sua presença afetando visualmente o ambiente. A imensa variedade de tipos de plásticos existentes e o grande volume descartado torna muito complexa a gestão

destes resíduos, fazendo com que a destinação dependa de vários fatores, como o tipo de polímero ou tipo de produto (HOPEWELL; DVORAK; KOSIOR, 2009).

Atualmente o que se busca é obter um produto obtido de polímero reciclado com as propriedades mais próximas possíveis do polímero virgem, para que possa ser empregado na confecção de materiais com aplicações mais nobres. A etapa de separação é muito importante, pois é nesta etapa que se limita o nível de impureza em no máximo 1%, pequenas contaminações por vidros, papel, metal ou outro polímero podem alterar as propriedades do polímero reciclado (SPINACÉ; PAOLI, 2004).

No Quadro 2 são demonstradas algumas propriedades, aplicações e a simbologia que deve ser empregada nos plásticos auxiliando na identificação e separação para a reciclagem, sendo esta simbologia única no Mundo, e estabelecida no Brasil pela NBR 13230 (ABNT, 2008).

Quadro 2 - Características dos plásticos mais encontrados nos resíduos sólidos

Simbologia	Tipo de plástico	Propriedades	Principais aplicações
	PET Politereftalato de etileno	Alta resistência mecânica e química, transparência e brilho	Fibras têxteis, frascos de refrigerantes e mantas de impermeabilização
	PEAD Polietileno de alta densidade	Alta rigidez e resistência	Tampas, vasilhames e frascos em geral
	PVC Policloreto de vinila	Flexibilidade com adição de modificadores e alta resistência à chama	Tubos rígidos de água e esgoto, tubos flexíveis e cortinas
	PEBD Polietileno de baixa densidade	Alta flexibilidade e boa resistência mecânica	Utensílios domésticos, sacos e frascos flexíveis
	PP Polipropileno	Boa resistência a choques e alta resistência química	Para-choques de carros, garrafas e pacotes
	PS Poliestireno	Grande rigidez, baixa resistência a choques ou riscos e boa transparência	Utensílios domésticos rígidos, brinquedos e indústria eletroeletrônica
	Outros	--	--

Fonte: Adaptado de CEMPRE (2014) e Forlin e Faria (2002)

Conforme ABRELPE (2015), no ano de 2015 o consumo de plásticos atingiu a marca de 6,99 milhões de toneladas. A Tabela 1 mostra o percentual de utilização dos principais plásticos.

Tabela 1 - Percentual de utilização dos principais plásticos

Tipo de plástico	Percentual de utilização (%)
PET	7,2
PEAD	17,5
PVC	15,7
PEBD	10,6
PP	21,9
PS	4,6
Outros	22,5

Fonte: Adaptado de ABIPLAST (2016)

Segundo a ABIPLAST (2015), o principal setor consumidor de plásticos é a construção civil com 25,7%, seguido da indústria de alimentos com 19% e fábricas de automóveis e peças com 12,1%. Na construção civil é utilizado em tubos, conexões, esquadrias, isolações acústica e térmica, vêm sendo usado para a redução do uso do concreto diminuindo o peso das estruturas. Na indústria de veículos têm como vantagem a redução de peso, flexibilidade e diminuição da corrosão. Para a indústria de alimentos os plásticos apresentam várias soluções, proporcionando maior segurança alimentar, redução de desperdícios e aumento da validade dos alimentos.

2.1.2 Politereftalato de etileno – PET

Os plásticos são polímeros produzidos a partir de processos petroquímicos. O PET foi desenvolvido em 1941 pelos químicos ingleses, e trata-se de um material inerte, leve, transparente e com boa resistência, por isso, passou a ser amplamente utilizado em embalagens de produtos alimentícios no início da década de 1980 e, especificamente, em 1985 nos Estados Unidos já eram produzidos 500 mil toneladas de embalagens. Devido sua resistência e barreira a gases, no início, as embalagens eram produzidas para armazenar bebidas carbonatadas. No Brasil, é utilizada para diversas outras linhas de produtos, embalagens de alimentos, produtos de higiene e limpeza, cosméticos e fármacos (CANELLAS, 2005).

Conforme CEMPRE (2016), 11% dos materiais coletados para reciclagem são plásticos. A Tabela 2 mostra o percentual de coleta dos principais plásticos.

Tabela 2 - Percentual de coleta dos principais plásticos

Tipo de plástico	Percentual de utilização (%)
PET	42
PEAD	23
PVC	2
PEBD	14
PP	9
PS	1
Outros	9

Fonte: Adaptado de CEMPRE (2016)

Quando é realizada a comparação entre o percentual de utilização do PET (Tabela 1), e o percentual de coleta (Tabela 2). Temos que, apesar de 7,2% do plástico utilizado ser PET, 42% do plástico coletado é PET.

Oliveira (2012) explica essa diferença através dos tipos de plásticos que possuem maior retorno para a reciclagem. A maior parte dos plásticos reciclados é oriunda de embalagens, estas sendo de refrigerante, leite ou água. As garrafas de água são os produtos plásticos com maior índice de reciclagem. Estas embalagens em sua maioria são formadas por PET. Enquanto os produtos fabricados com outros tipos de plásticos possuem uma vida útil mais longa, sendo bens duráveis, assim sendo menos reciclados.

2.1.3 Reciclagem de Polímeros

Existem quatro categorias de reciclagem dos polímeros. A reciclagem primária consiste em converter os resíduos em produtos com características equivalentes às dos produtos originais. A reciclagem secundária possui menos exigências, do que a do produto original pode ser transformada em outro tipo de produto. Estas duas primeiras categorias são conhecidas como reciclagens mecânicas ou físicas, se diferenciam uma da outra, pois a primeira utiliza polímero pós-industrial, e na segunda, pós-consumo. Na terciária, também chamada de reciclagem química, se obtêm insumos químicos ou combustíveis a partir dos resíduos poliméricos. Já com a reciclagem quaternária, conhecida como energética, há a recuperação de energia por incineração controlada (SPINACÉ; PAOLI, 2004).

2.1.4 Reciclagem do PET e a possibilidade de reutilização para a produção de concretos

Segundo a ABIPET (2013), no ano de 2011 foram consumidas 572 mil toneladas de PET no Brasil e já com estimativa de que no ano de 2016 seriam consumidas 840 mil toneladas. O Brasil é um dos maiores recicladores do mundo, reciclando em média 51% do PET produzido, mesmo assim, no ano de 2011 foram cerca de 280 mil toneladas de PET, descartadas de maneira incorreta no meio ambiente, correspondente aos 49% do PET que não é reciclado.

O PET reciclado possui muitas variedades de utilização. A Tabela 3 mostra os usos finais do PET reciclado.

Tabela 3 - Consumo final do PET

Uso final do PET	Porcentagem de utilização
Resinas insaturadas e alquílicas	28,6%
Têxteis	25,7%
Embalagens para alimentos e não alimentos	25,7%
Lâminas e chapas	8,6%
Fitas de arquear	5,7%
Outros	5,7%

Fonte: Adaptado de ABIPET (2015)

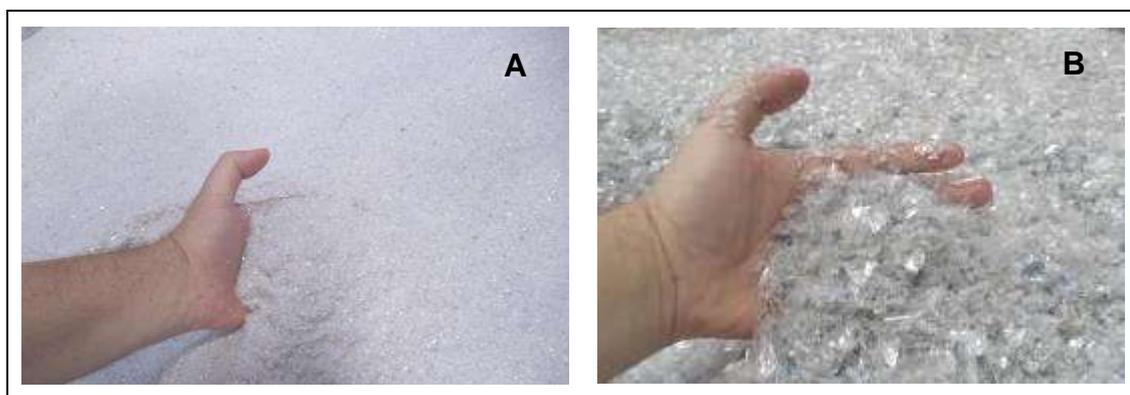
Conforme ABIPET (2013) a reciclagem do PET acontece em três etapas. A primeira é a recuperação, que inicia com o descarte e coleta das embalagens, após acontece a revalorização, quando há a produção de matéria-prima reciclada. E por fim a transformação, que é a etapa final quando a matéria-prima é transformada em um produto novo. Na revalorização acontece a moagem e lavagem do PET, as embalagens são separadas por cor e são retirados contaminantes.

Os produtos resultantes destes processos são chamados de pó ou areia de PET e flake de PET, com dimensões aproximadas de 2,4 mm e 19 mm, respectivamente. O flake é armazenado e encaminhado para a produção de novos produtos, o pó de PET é considerado uma perda e caracteriza-se como resíduo sólido (ALMEIDA et al., 2004).

Almeida et. al (2004) ainda sugere que devido as características dos grãos, o pó de PET possa ser utilizado em substituição à areia natural para a produção de

concretos convencionais. A Figura 1 mostra os produtos resultantes do processo de revalorização do PET.

Figura 1 – Produtos resultantes do processo de revalorização do PET, (A) pó de PET e (B) flake de PET



Fonte: CNP Reciclagem (2015, Não paginado)

Em sua pesquisa, Jardim (2016) classificou a areia de PET como granulometria média, devido ao módulo de finura estar entre os limites de 2,11 a 3,38 mm e identificou que a curva granulométrica da areia de PET estudada estava praticamente em sua totalidade dentro dos limites granulométricos da zona ótima (NBR 7211). Segundo a autora, a característica granulométrica desse agregado torna possível a sua utilização em substituição a areia natural.

2.2 Concreto

2.2.1 Concreto com agregados reciclados

As pesquisas envolvendo a substituição de materiais convencionais por materiais alternativos na construção civil não é inédita. Existem vários trabalhos que utilizam outros materiais em substituição dos agregados e aglomerantes em concretos e argamassas. Sempre com o objetivo além de melhorar propriedades dos concretos e argamassas, também de verificar a viabilidade da substituição. Sempre buscando a diminuição do consumo de recursos naturais e reutilização de resíduos, assim diminuindo impactos ambientais. O Quadro 3 mostra diferentes estudos com materiais reciclados.

Quadro 3 - Pesquisas realizadas com materiais reciclados

Autor	Foco da pesquisa			
	Produto final	Material substituído	Material reciclado	Avaliação
Gonçalves (2001)	Concreto	Agregado miúdo e graúdo natural	Resíduos de concreto	Propriedades mecânicas
Almeida et al. (2004)	Concreto estrutural	Agregado miúdo natural	Agregado reciclado de PET	Propriedades mecânicas e trabalhabilidade
Canellas (2005)	Argamassa	Agregado miúdo natural	Agregado reciclado de PET	Propriedades mecânicas
Lacerda; Helene (2005)	Concreto	Cimento Portland	Metacaulim	Propriedades mecânicas e trabalhabilidade
Buttler et.al (2006)	Blocos estruturais de concreto	Agregado miúdo e graúdo natural	Resíduos de concreto	Massa específica, absorção e porosidade
Neto (2006)	Concreto	Agregado miúdo natural	Agregado miúdo britado de rocha calcária e basáltica	Propriedades mecânicas
Cabral et al. (2009)	Concreto	Agregado miúdo e graúdo natural	Resíduos Cerâmica vermelha	Propriedades mecânicas e porosidade
Pietrobelli (2010)	Concreto	Agregado miúdo natural	Agregado reciclado de PET	Propriedades mecânicas
Silva et al. (2012)	Concreto	Cimento Portland	Resíduos de vidro	Propriedades mecânicas
Tonus; Minozzi (2013)	Concreto	Agregado graúdo natural	Resíduos Cerâmica vermelha	Propriedades mecânicas
Calcado (2015)	Argamassa	Agregado miúdo e graúdo natural	Resíduos da construção civil	Propriedades mecânicas
Silva (2015)	Concreto autoadensável	Agregado graúdo natural	Resíduos da construção civil	Propriedades mecânicas, viscosidade e capacidade de fluidez
Hojo; Martins (2015)	Concreto	Cimento Portland	Cinza leve do bagaço de cana-de-açúcar	Propriedades mecânicas
Jardim (2016)	Concreto	Agregado miúdo natural	Agregado reciclado de PET	Propriedades mecânicas
Pandolfi (2016)	Concreto para pavimentação	Agregado graúdo natural	Resíduos da construção civil	Propriedades mecânicas e de durabilidade
Scobar (2016)	Concreto leve	Agregado graúdo natural	Argila expandida	Propriedades mecânicas e absorção
Vaz (2016)	Argamassa	Agregado miúdo natural	Agregado reciclado de PET	Propriedades mecânicas e absorção de água
Padoin (2017)	Concreto autoadensável	Cimento Portland	Cinza de casca de arroz	Propriedades mecânicas e físicas

Fonte: Elaboração própria

2.2.2 Concreto com agregado reciclado de PET

Existem algumas pesquisas utilizando a substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado na produção de argamassas e concretos. As pesquisas variam em teores de substituição utilizados, traços e nas propriedades avaliadas.

Canellas (2005) avaliou a argamassa com substituição do agregado miúdo natural pelo agregado reciclado de PET, nos percentuais 10%, 30% e 50%, em peso e volume. Na substituição em peso, o traço apresentou uma quantidade muito grande de agregado de PET, bastante superior ao calculado em volume. Assim concluiu que a substituição deve ser calculada em volume para que haja um equilíbrio entre a quantidade de agregado natural e agregado de PET. Ainda obteve como resultado a possibilidade da substituição do agregado natural pelo agregado de PET na produção de concreto, utilizado em elementos pré-moldados não estruturais como em acabamentos para revestimentos de paredes e pisos, blocos para pavimentação, meios-fios e artefatos para o mobiliário urbano, auxiliando assim na destinação destes resíduos.

Almeida et al. (2004), utilizou percentuais de 25%, 50%, 75% e 100% como substituição em volume do agregado miúdo natural por agregado reciclado de PET em concretos estruturais. Concluiu que a trabalhabilidade do concreto diminuiu com o aumento do teor de agregado reciclado. Para as misturas com 100% de PET, o abatimento chegou à zero. Em relação à resistência à compressão axial, os concretos com substituição maior ou igual a 50% apresentaram perda da capacidade portante aos 28 dias, chegando à metade dos valores encontrados para as misturas de referência.

Pietrobelli (2010) substituiu o agregado miúdo natural por agregado reciclado de PET em concretos de 30 MPa e 45 MPa. Os teores de substituição foram de 15%, 30% e 45%. Sua pesquisa concluiu que para que possam ser atendidas as solicitações de carga previstas, há a necessidade de ajustar a proporção entre as quantidades de cimento e agregado reciclado de PET, necessitando ajustar o traço para um consumo maior de cimento, porém esta relação não é uniforme. O autor observou que cada traço necessita de um ajuste próprio. Concluiu que existe a possibilidade da substituição, desde que seja para concretos não estruturais e produção de concretos leves.

Jardim (2016) estudou concretos com substituição do agregado miúdo natural pelo agregado reciclado de PET nos percentuais de 10% e 15% e avaliou suas propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral). Verificou através dos resultados granulométricos (NBR 7211), que o agregado de PET atendeu os limites normativos. Também observou que o concreto com agregado de PET apresentou uma diminuição do seu peso. Com base na análise de variância dos resultados obtidos, o autor concluiu que a substituição nos teores estudados não alterou as propriedades mecânicas dos concretos investigados.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as variáveis independentes e de resposta e também os materiais e os métodos que foram utilizados para a realização desse trabalho.

3.1 Definição das variáveis de resposta

A fim de avaliar a viabilidade da substituição parcial de agregado miúdo natural por agregado reciclado de PET, foram definidas como variáveis de resposta:

- a trabalhabilidade do concreto - NBR NM 67 (ABNT 1998);
- a resistência à compressão simples - NBR 5739 (ABNT 2007);
- a resistência à tração na flexão - NBR 12142 (ABNT 2010);
- a retração por secagem - ASTM C 157 (ASTM 2014).

Após a definição das variáveis de resposta, foram determinados os fatores controláveis, listados abaixo:

- tipo de cimento - CPIV 32 (Cimento Portland Pozolânico);
- porcentagens de substituição de 10% e 15% (em volume) de agregado miúdo natural por agregado reciclado de PET;
- idades de controle para os ensaios mecânicos (resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão): 7, 28 e 91 dias;
- idades de controle para os ensaios de retração: 1, 4, 7, 14, 28, 56, 112 e 224 de acordo com a ASTM C 157 (ASTM 2014).

As porcentagens de substituição (10% e 15%) de areia natural por areia de PET foram definidas em função dos estudos realizados por Jardim (2016). A pesquisadora concluiu que, entre os teores estudados esses teores foram os que apresentaram os melhores resultados nas propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral) dos concretos investigados.

Com relação ao ensaio de retração, não foram realizadas as leituras da variação aos 448 dias, recomendada por norma ASTM C 157 (ASTM 2014) por ser um período superior ao término deste trabalho.

3.2 Caracterização dos materiais

Os itens 3.2.1 e 3.2.2 apresentam os ensaios que foram realizados para as caracterizações dos materiais que foram utilizados para a confecção dos concretos.

3.2.1 Cimento

Como material aglomerante foi utilizado o cimento Portland CP IV 32, por ser o tipo de cimento mais utilizado na região de Alegrete/Rs. As características físicas, químicas e mecânicas foram fornecidas pelo fabricante baseado no lote fabricado, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Exigências físicas, mecânicas e químicas do cimento.

Exigências Físicas e Mecânicas	Finura			
	Blaine (cm ³ /g)	# 200 (%)	# 325 (%)	
	4770	0,1	0,8	
	Tempo de pega			
	Início de Pega (min)		Fim de pega (min)	
	375		460	
	Resistência à compressão (MPa)			
	03 dias (MPa)	07 dias (MPa)	28 dias (MPa)	
	22,5	25,2	40,6	
	Exigências Químicas	MgO (%)	SO ₃ (%)	Perda ao Fogo média (%)
4,5		1,8	1,8	38,0

Fonte: fabricante, em 29 de maio de 2017

3.2.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo natural utilizado nessa pesquisa é proveniente do rio Ibicuí (Manoel Viana/RS). A areia de PET foi adquirida da empresa PETCEU, localizada no Paraná /PR.

As caracterizações do agregado miúdo natural e do agregado reciclado de PET seguiram as determinações das normas regulamentadoras, conforme apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 - Ensaio e Normas utilizados para a caracterização dos agregados

Agregados	Ensaio	Norma Regulamentadora
Agregado miúdo natural Agregado reciclado de PET	Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
	Massa específica	NBR 9776 (ABNT, 1987)

Fonte: Elaboração própria

Os resultados encontrados na caracterização física do agregado miúdo natural e do agregado reciclado de PET encontram-se respectivamente nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Caracterização física do agregado miúdo natural

Determinações	Resultados		
	Peneiras (mm)	% Retida	%Retida Acumulada
Composição granulométrica	4,75	0,19	0,19
	2,36	0,52	0,72
	1,18	2,13	2,84
	0,6	8,58	11,43
	0,3	51,97	63,40
	0,15	31,21	94,61
	< 0,15	5,39	100,00
	Total	100,00	
		Diâmetro máximo	1,18
		Módulo de finura	1,73
Massa unitária (g/cm ³)	1,63		
Massa específica (g/cm ³)	2,65		

Fonte: Elaboração própria

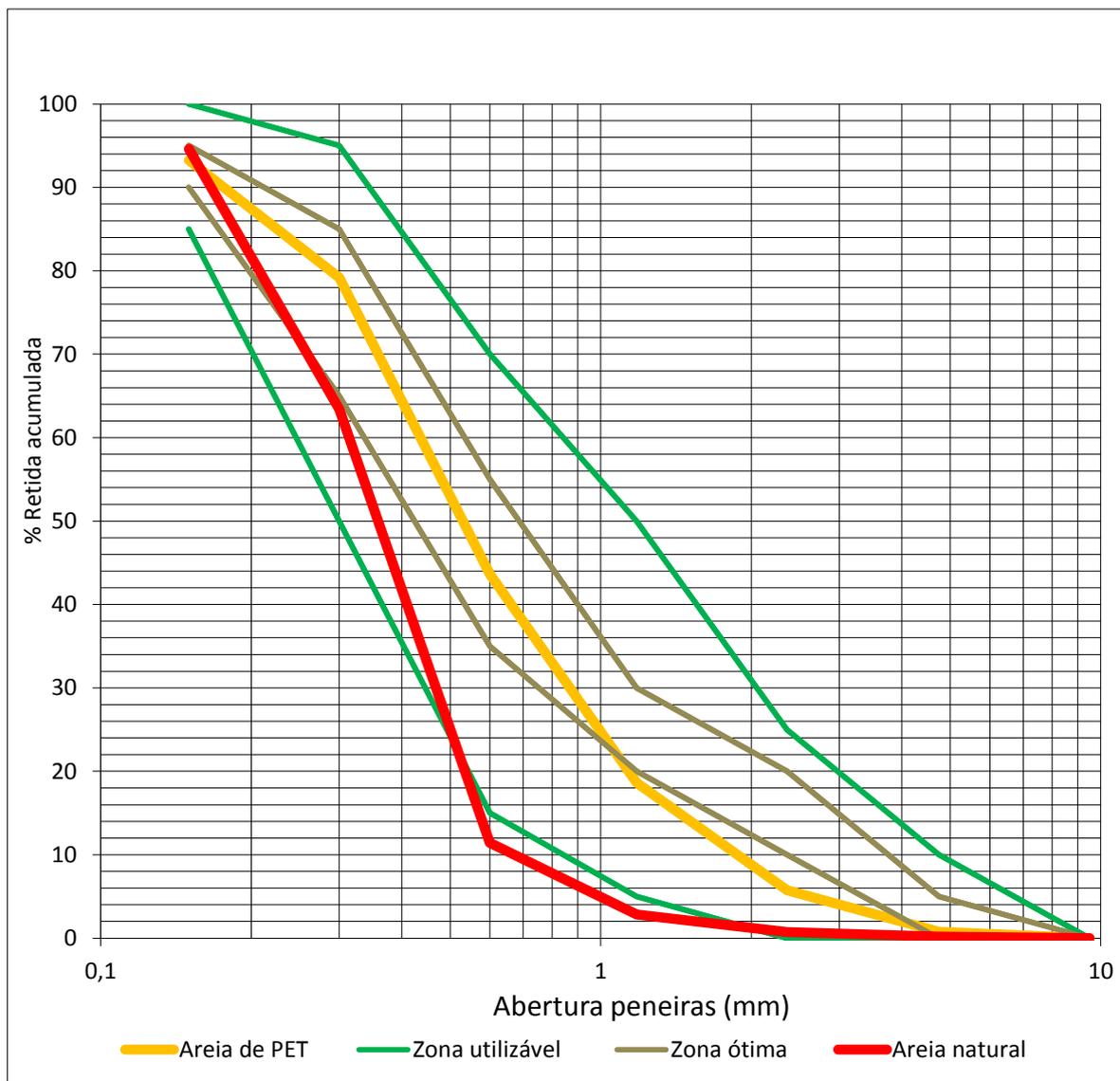
Tabela 6 – Caracterização física do agregado reciclado de PET

Determinações	Resultados		
	Peneiras (mm)	% Retida	%Retida Acumulada
Composição granulométrica	4,75	0,75	0,75
	2,36	5,00	5,75
	1,18	12,86	18,61
	0,6	25,06	43,67
	0,3	35,53	79,19
	0,15	14,06	93,25
	< 0,15	6,75	100,00
	Total	100	
		Diâmetro máximo (mm)	4,75
		Módulo de finura	2,41
Massa unitária (g/cm ³)	0,28		
Massa específica (g/cm ³)	1,36		

Fonte: Elaboração própria

Os Gráficos 2 representa as distribuições granulométrica do agregado miúdo natural e do agregado reciclado de PET.

Gráfico 2 – Curva granulométrica agregado miúdo natural e agregado reciclado de PET



Fonte: Elaboração própria

Ao analisar o Gráfico 2 pode-se perceber que a curva granulométrica do agregado miúdo natural estudado encontra-se quase toda dentro do limite inferior da zona utilizável, somente no intervalo onde os grãos possuem entre 0,5 e 2 mm a curva encontra-se fora da zona utilizável e pode-se ver que a curva granulométrica do agregado reciclado de PET encontra-se praticamente toda na zona ótima,

somente o intervalo onde os grãos possuem entre 1 e 4 mm a curva sai da zona ótima mas permanece dentro do limite inferior da zona utilizável.

Também foi realizada a composição granulométrica da mistura de agregado miúdo natural e agregado reciclado de PET, foram feitas duas misturas, uma com 10% e a outra com 15% de agregado reciclado de PET, assim fazendo as mesmas proporções que serão utilizadas nos traços dos concretos.

As tabelas 7 e 8 mostram os resultados da composição granulométrica da mistura com 10% e 15% respectivamente.

Tabela 7 – Composição granulométrica da mistura com 10% de PET

Determinações	Resultados		
	Peneiras (mm)	% Retida	%Retida Acumulada
Composição granulométrica	4,75	0,09	0,09
	2,36	0,84	0,93
	1,18	3,28	4,21
	0,6	10,30	14,51
	0,3	49,56	64,07
	0,15	31,11	95,17
	< 0,15	4,83	100,00
	Total	100,00	
	Diâmetro máximo (mm)		1,18
	Módulo de finura		1,79

Fonte: Elaboração própria

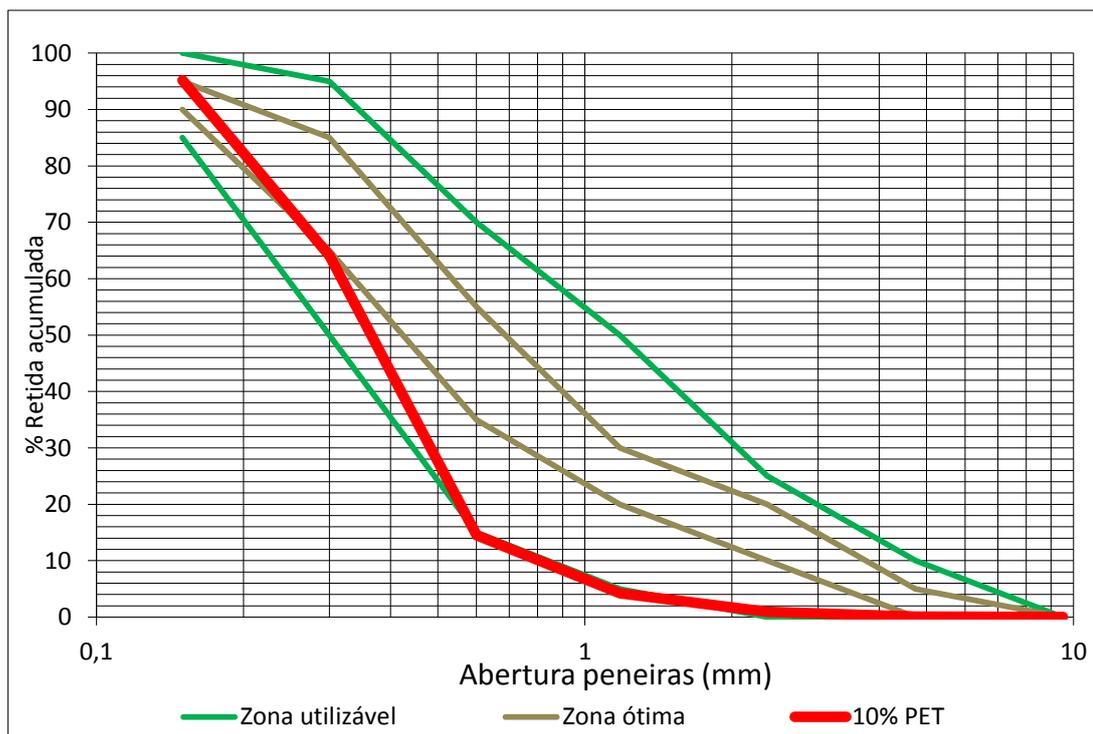
Tabela 8 – Composição granulométrica da mistura com 15% de PET

Determinações	Resultados		
	Peneiras (mm)	% Retida	%Retida Acumulada
Composição granulométrica	4,75	0,27	0,27
	2,36	0,84	1,12
	1,18	3,83	4,95
	0,6	11,08	16,02
	0,3	48,91	64,93
	0,15	30,61	95,53
	< 0,15	4,47	100,00
	Total	100,00	
	Diâmetro máximo (mm)		1,18
	Módulo de finura		1,83

Fonte: Elaboração própria

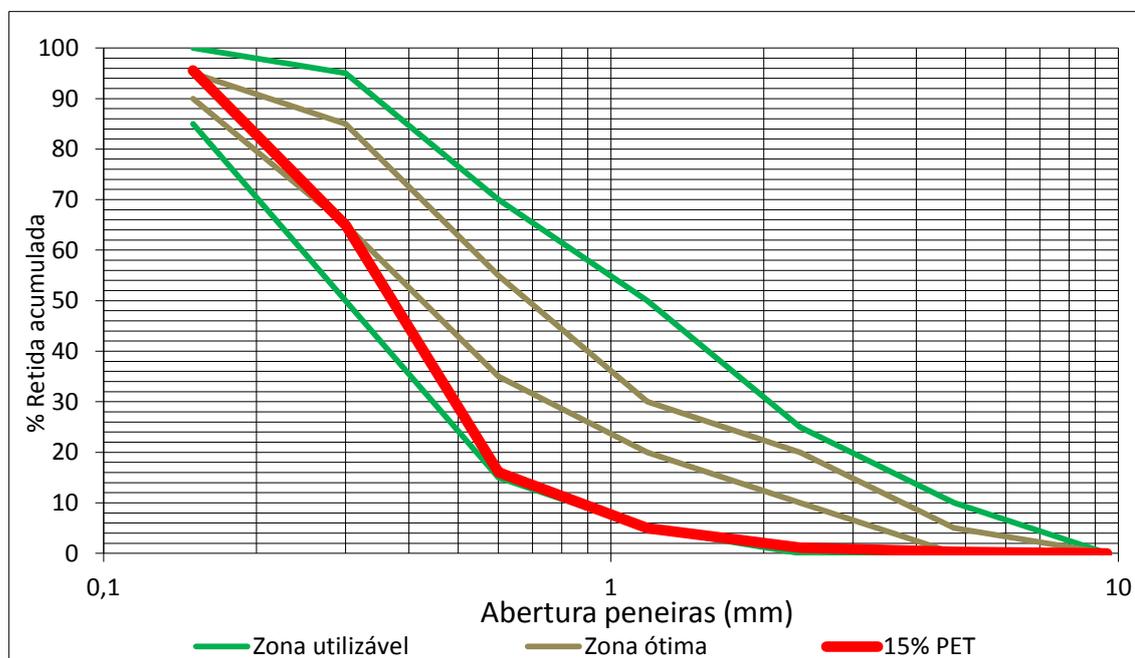
Os Gráficos 3 e 4 representam a distribuição granulométrica das misturas com 10% e 15% de agregado reciclado de PET respectivamente.

Gráfico 3 – Curva granulométrica da mistura com 10% de PET



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 4 – Curva granulométrica da mistura com 15% de PET



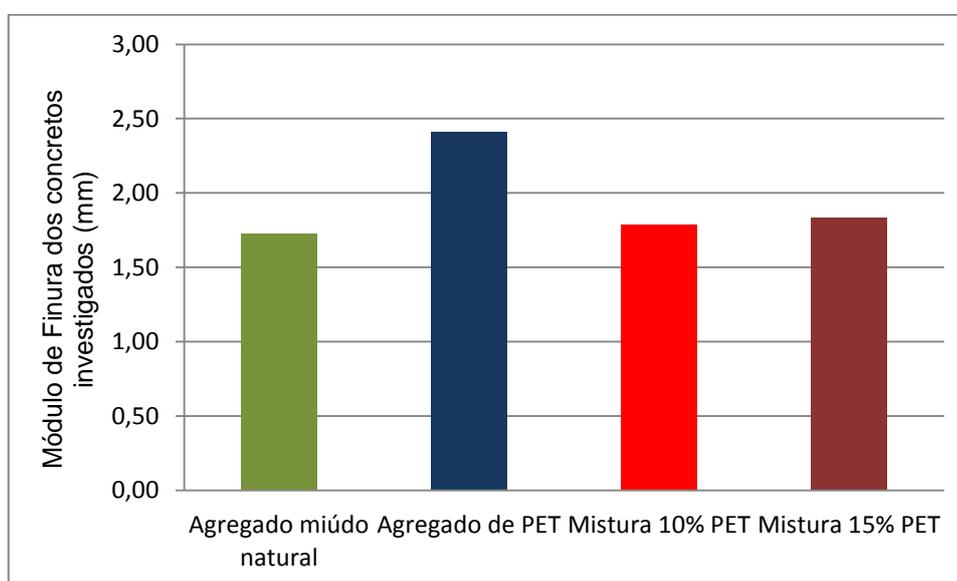
Fonte: Elaboração própria

Observando os gráficos 3 e 4 nota-se que as misturas de agregado miúdo natural e agregado reciclado de PET apresentam curvas granulométricas muito parecidas, ambas as curvas encontram-se nos limites inferiores da zona utilizável,

tendo uma pequena parte desta curva onde os grãos possuem entre 0,1 e 0,3 mm, dentro da zona ótima. Pode-se concluir então que tanto o agregado reciclado de PET, e as misturas com 10% e 15% de PET se enquadram nos limites estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2009) como agregado miúdo adequado para utilização em concretos.

O Gráfico 5 apresenta os resultados para os módulos de finura dos agregados miúdos utilizados e das misturas obtidas.

Gráfico 5 – Módulo de finura dos agregados miúdos



Fonte: Elaboração própria

Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), os agregados miúdos com módulo de finura entre 1,55 a 2,20 encontram-se dentro dos limites inferiores da zona utilizável. Ao analisar o Gráfico 5 pode-se observar que o agregado miúdo natural e as misturas com 10% e 15% de PET encontram-se nestes limites. Já o agregado reciclado de PET encontra-se dentro dos limites da zona ótima, já que estes limites são entre 2,20 a 2,90.

3.2.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado nessa pesquisa é de origem basáltica e proveniente de jazida da região de Alegrete/RS.

As caracterizações do agregado graúdo seguiram as determinações das normas regulamentadoras, conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 - Ensaio e Normas utilizados para a caracterização dos agregados.

Agregados	Ensaio	Norma Regulamentadora
Agregado graúdo	Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
	Massa específica	NBR NM 53 (ABNT, 2003)

Fonte: Elaboração própria

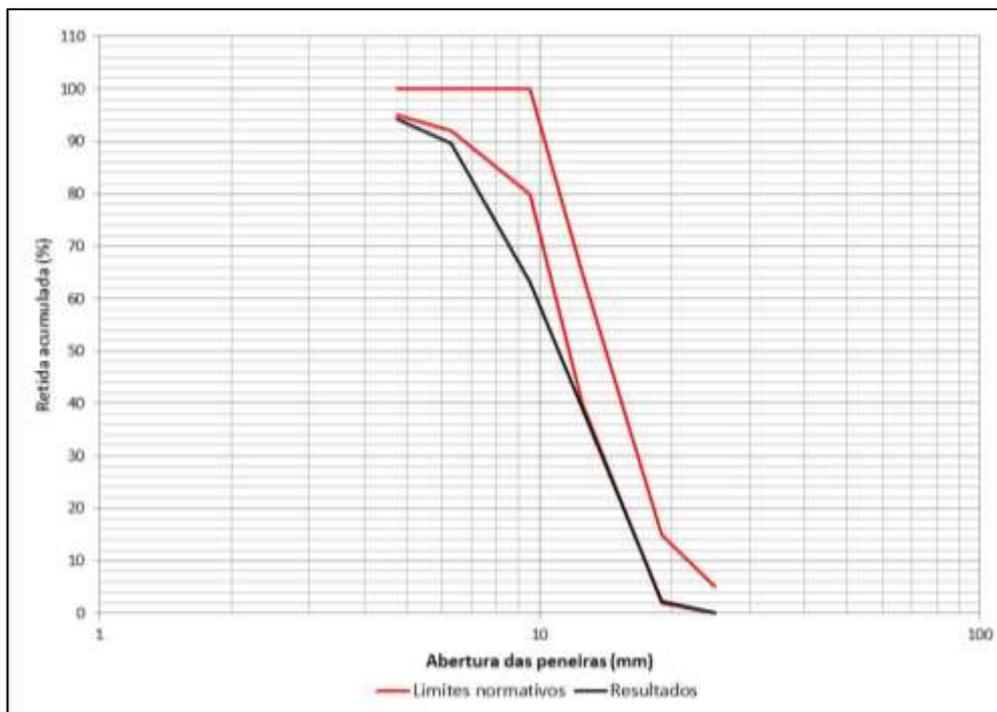
A tabela 9 mostra os resultados encontrados na caracterização física do agregado graúdo. O Gráfico 6 apresenta a curva granulométrica do agregado graúdo.

Tabela 9 – Caracterização física do agregado graúdo

Determinações	Resultados		
	Peneiras (mm)	% Retida	%Retida Acumulada
Composição granulométrica	25,00	0,00	0,00
	19,10	2,25	2,25
	12,70	36,85	39,10
	9,52	24,11	63,21
	6,35	26,45	89,65
	4,75	4,67	94,32
	2,36	1,20	95,53
	1,18	0,25	95,78
	0,60	0,00	95,78
	0,30	0,00	95,78
	0,15	0,00	95,78
	Fundo	4,22	100,00
	Total	100,00	
		Diâmetro máximo (mm)	19,00
	Módulo de finura	6,38	
Massa unitária (g/cm ³)	1,45		
Massa específica (g/cm ³)	2,83		

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 6 – Curva granulométrica agregado graúdo



Fonte: Elaboração própria

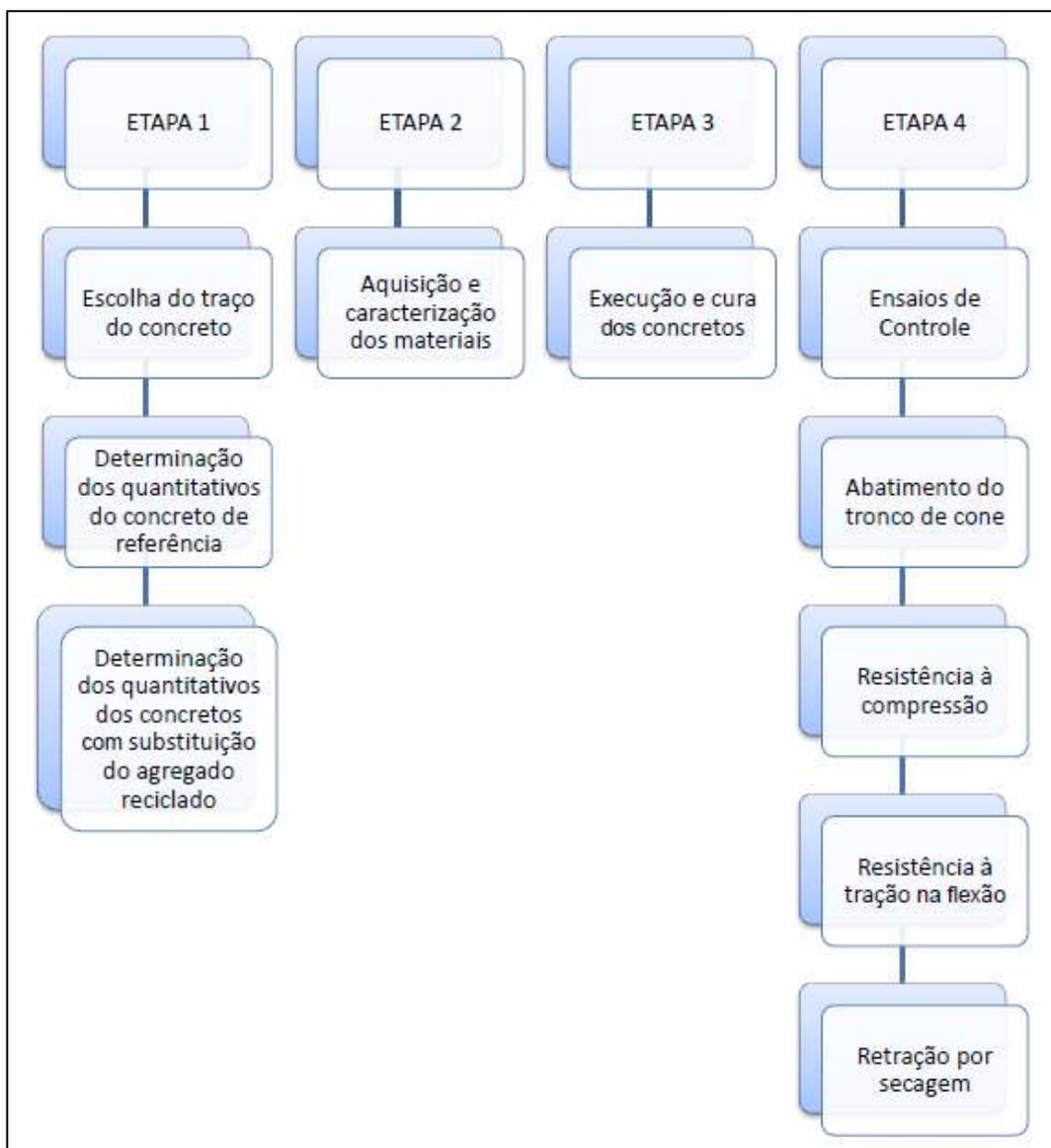
De acordo com o Gráfico 6 a curva granulométrica do agregado graúdo utilizado na pesquisa encontra-se em parte abaixo do limite inferior estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2009) e outra parte encontra-se no limite inferior.

3.3 Programa Experimental

O programa experimental foi dividido em quatro etapas: a) escolha do traço, b) caracterização dos materiais, c) produção dos concretos e d) realização dos ensaios de controle.

A Figura 2 apresenta o detalhamento do programa experimental dessa pesquisa.

Figura 2 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Elaboração própria

3.3.1 Definição do traço

A definição do traço foi baseada nos resultados da pesquisa de Jardim (2016). Dentre os traços investigados pela pesquisadora, optou-se por escolher um traço com consumo de cimento intermediário, conforme apresentado na Tabela 10. A reprodução do traço de Jardim (2016) permitiu ampliar o conhecimento sobre o comportamento dos concretos frente a outras propriedades mecânicas e de durabilidade, uma vez que os materiais utilizados para a produção dos concretos foram os mesmos.

Tabela 10 – Traço unitário utilizado na pesquisa.

Traço Unitário	1:2,06:2,94
Relação a/c	0,50
Consumo de cimento	372 kg/m ³
Fck 28 dias	25 MPa

Fonte: Jardim (2016, p. 41)

3.3.2 Produção dos concretos

O preparo do concreto foi executado em betoneira de eixo inclinado, conforme as prescrições da NBR 12655 (ABNT, 2015). O cimento, o agregado graúdo, o agregado miúdo natural e a água foram determinados em massa, enquanto que o agregado reciclado de PET foi medido em volume, com dispositivo dosador.

De início foi realizada a imprimação da betoneira, e após essa etapa, os materiais foram adicionados na seguinte sequência: agregado graúdo, aproximadamente 70% da água, o cimento, o agregado miúdo natural e de PET e o restante da água. Então foi realizada a mistura por aproximadamente 4 minutos.

Foram realizados três diferentes traços de concreto, o traço de referência, e dois traços com a substituição parcial do agregado miúdo natural por agregado reciclado de PET, um com 10% e outro com 15% de substituição. Para cada traço foram moldados corpos de prova para a realização dos ensaios, com diferentes idades conforme mostrado na Tabela 11.

Tabela 11 – Número de corpos de prova e idade de realização de ensaios

Ensaio de controle	Traço de Referência			Traço 10% de PET			Traço 15% de PET		
	Data dos Ensaio (dias)			Data dos Ensaio (dias)			Data dos Ensaio (dias)		
	7	28	91	7	28	91	7	28	91
Resistência à compressão simples	3 cp's	3 cp's	3 cp's	3 cp's	3 cp's	3 cp's	3 cp's	3 cp's	3 cp's
Resistência à tração na flexão	3 cp's	3 cp's	3 cp's	3 cp's	3 cp's	3 cp's	3 cp's	3 cp's	3 cp's
Retração por secagem	4 cp's			4 cp's			4 cp's		
Total de cp's moldados por traço	22 cp's			22 cp's			22 cp's		
Total de cp's moldados	66 cp's								

Fonte: Elaboração própria

3.3.3 Moldagem e cura dos Corpos de Prova

Para a realização dos ensaios previstos foram moldados os corpos de prova necessários para cada ensaio. As dimensões e formatos dos corpos de prova estão descritos no Quadro 6.

Os procedimentos para moldagem e cura dos corpos de prova respeitaram as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015).

Quadro 6 – Dimensões e formatos corpos de prova

Ensaio	Formato	Dimensões (cm)
Resistência à compressão	Cilíndrico	10 x 20
Resistência à tração na flexão	Prismático	10 x 10 x 40
Retração por secagem	Prismático	7 x 7 x 28

Fonte: Elaboração própria

3.3.4 Ensaaios

Os ensaios realizados neste trabalho tiveram como finalidade verificar propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. Foram realizados ensaios com o concreto de referência para que fosse possível fazer uma comparação entre os concretos com diferentes teores de substituição de agregado miúdo reciclado de PET e para que houvesse a verificação de como os comportamentos dos diferentes concretos se assemelham. Os itens 3.3.4.1 à 3.3.4.4 apresentam os ensaios que foram realizados nessa pesquisa.

3.3.4.1 Abatimento do tronco de cone

A trabalhabilidade do concreto fresco foi determinada pelo ensaio de Abatimento do Tronco de Cone (Slump Test), conforme as recomendações da NM 67 (ABNT, 1998). O parâmetro de controle para a trabalhabilidade dos concretos foi estabelecido em 90 ± 100 mm.

A Tabela 12 apresenta os resultados de trabalhabilidade dos diferentes concretos confeccionados.

Tabela 12 – Trabalhabilidade dos diferentes traços

Traço	Abatimento (mm)
Referência	120
10% PET	100
15% PET	40

Fonte: Elaboração própria

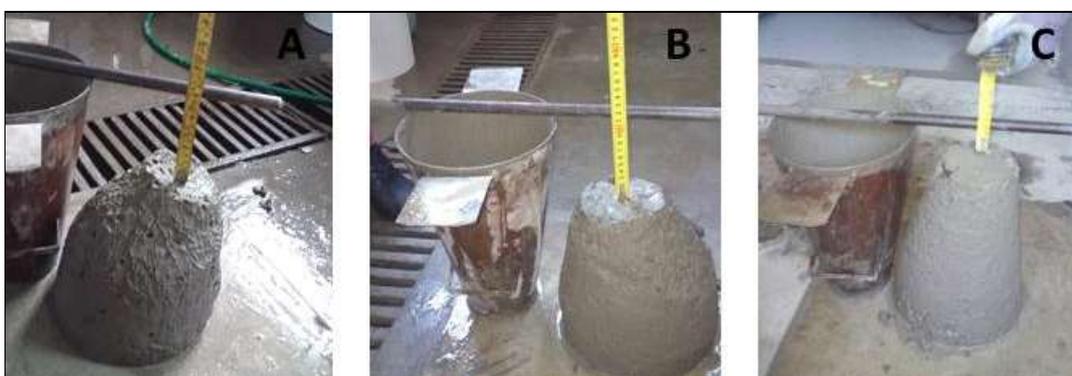
Ao comparar os valores da trabalhabilidade dos diferentes traços, pode-se perceber que com o aumento do teor de PET na mistura, promoveu uma diminuição do abatimento. Os concretos foram confeccionados em dias distintos, havendo variações de temperatura e umidade relativa do ar dentro do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UNIPAMPA. Acredita-se que essas variações podem ter contribuído para a perda de abatimento dos concretos. A Tabela 13 mostra os valores de temperatura e umidade relativa do ar, observadas durante as moldagens; e a Figura 3 apresenta a medição do abatimento dos diferentes concretos.

Tabela 13 – Temperatura e umidade relativa do ar nos dias de execução dos concretos

Traço	Temperatura (C°)	Umidade do ar (%)
Referência	18	54
10% PET	28,1	41
15% PET	27,7	40

Fonte: Elaboração própria

Figura 3 – Determinação do abatimento, (A) concreto de referência, (B) concreto com 10% de PET e (C) concreto com 15% de PET

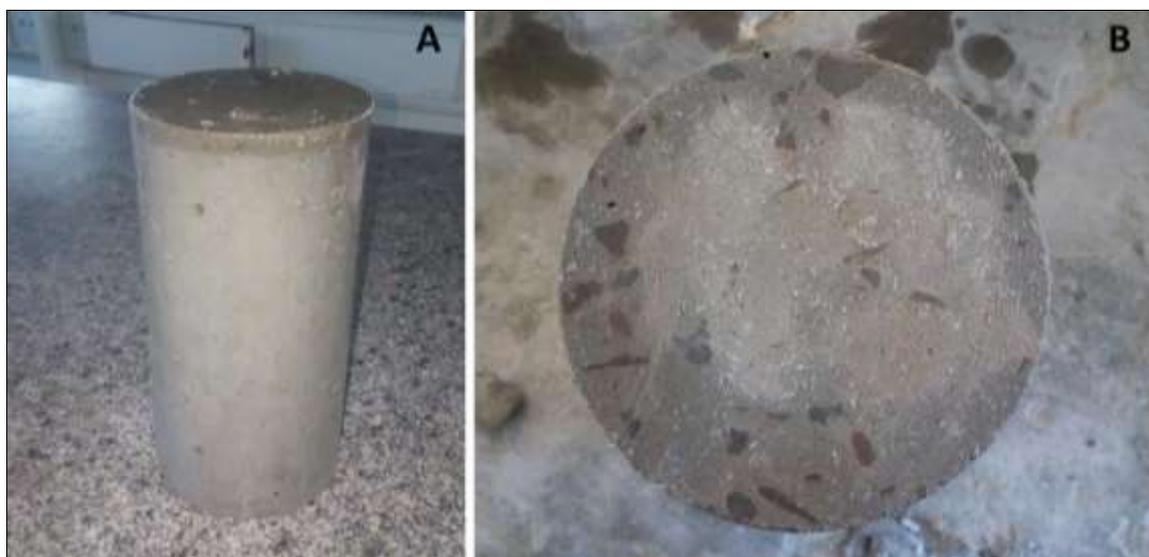


Fonte: Elaboração própria

3.3.4.2 Resistência à compressão

O ensaio para a determinação da resistência à compressão simples em corpos de prova cilíndricos é determinado pela NBR 5739 (ABNT 2007). Após o período de cura, os corpos de prova tiveram suas bases retificadas, conforme NBR 5738 (ABNT 2015). A retificação garante a planicidade das amostras permitindo que o carregamento seja aplicado uniformemente sobre a superfície. A Figura 4 mostra um corpo de prova cilíndrico (Figura 4A) e a seção do corpo de prova retificado (Figura 4B).

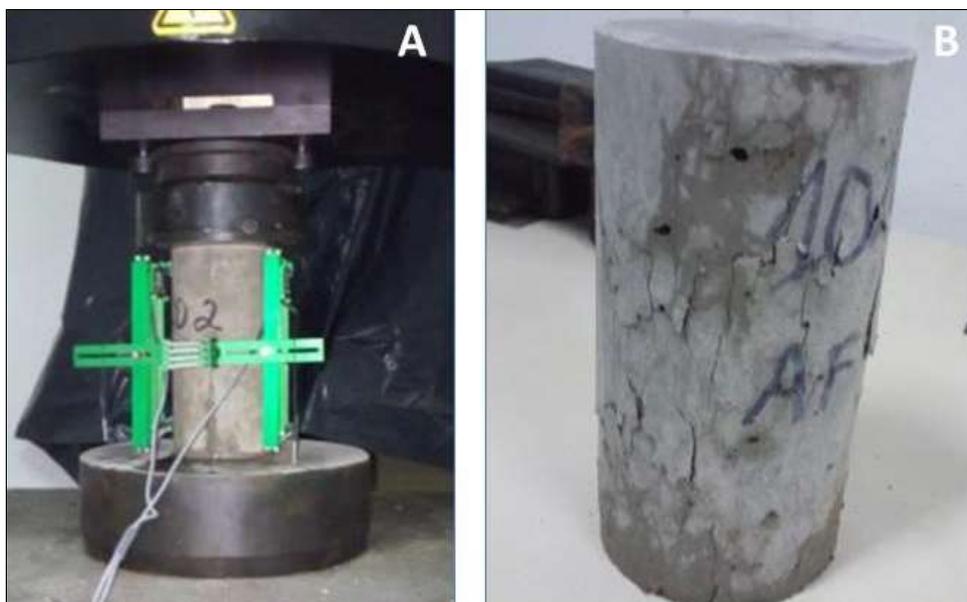
Figura 4 – Corpo de prova cilíndrico, (A) corpo de prova não retificado, (B) seção retificada de corpo de prova com 15% de PET



Fonte: Elaboração própria

Após a retificação, os corpos de prova eram posicionados centralizados entre os pratos de compressão (Figura 5A) e o carregamento era aplicado continuamente e sem choques. A velocidade de carregamento foi de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s (de acordo com a NBR 5739). O carregamento cessava quando observava-se uma queda de força no sensor da prensa, o que indicava a ruptura do corpo de prova (Figura 5B).

Figura 5 – Ensaio de compressão simples, (A) corpo de prova posicionado na prensa, (B) corpo de prova rompido

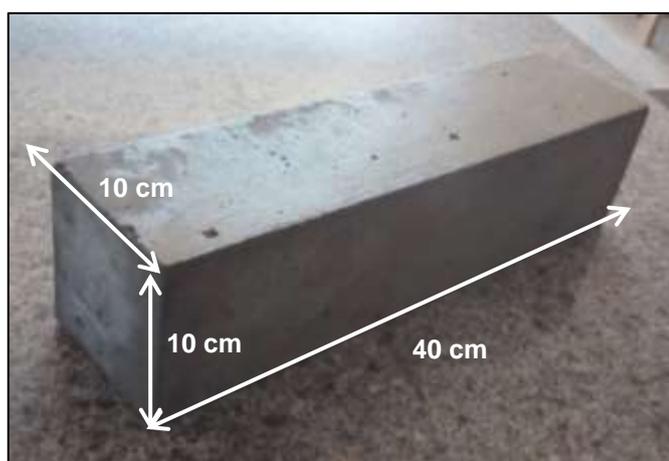


Fonte: Elaboração própria

3.3.4.3 Resistência à tração na flexão

O ensaio que determina a resistência à tração na flexão seguiu as recomendações da NBR 12142 (ABNT, 2010). A Figura 6 apresenta o aspecto dos corpos de prova utilizados no experimento.

Figura 6 - Dimensões do corpo de prova



Fonte: Elaboração própria

Nestes corpos de prova foram traçadas linhas, primeira linha com 5 cm de distância da borda e mais 3 linhas com distância de 10 cm entre elas, a última também deve ter 5 cm da borda. As marcações foram feitas conforme demonstrado

na Figura 7. Estas demarcações são feitas conforme descrito na NBR 12142 (ABNT, 2010), tem como finalidade mostrar a localização da ruptura, pois é necessário para a definição da equação utilizada para o cálculo da resistência à tração na flexão.

Figura 7 - Demarcação do corpo de prova



Fonte: Elaboração própria

Depois de realizada as demarcações, os corpos de prova foram posicionados na prensa (Figura 8) e o carregamento foi aplicado. A figura 9 mostra o corpo de prova após o rompimento no terço médio.

Figura 8 – Corpo de prova posicionado na prensa



Fonte: Elaboração própria

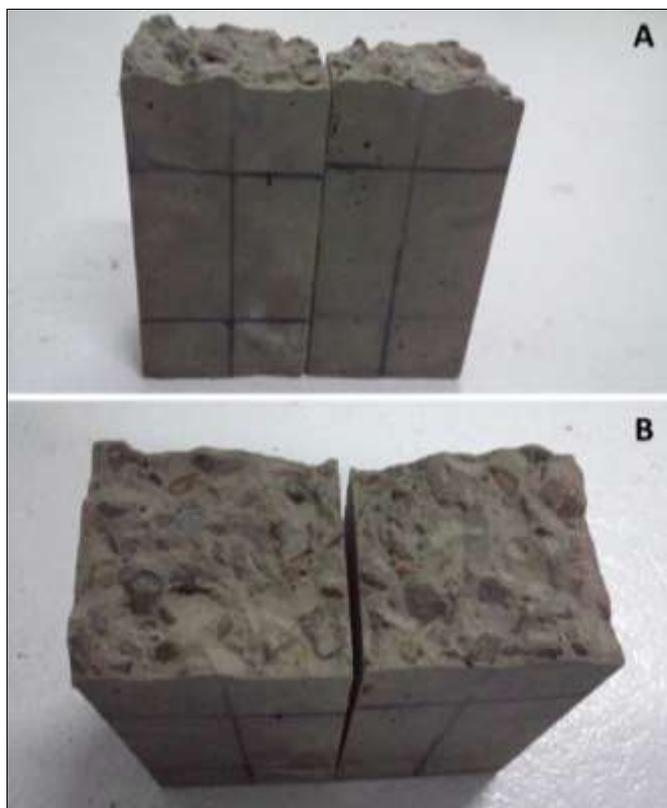
Figura 9 – Corpo de prova após rompimento



Fonte: Elaboração própria

Todos os corpos de prova submetidos ao ensaio romperam no terço médio, a Figura 10 mostra a seção de corpo de prova rompido, e pode se observar que o rompimento acontece na interface agregado-argamassa.

Figura 10 – Corpo de prova rompido após ensaio, (A) corpo de prova rompido no terço médio, (B)

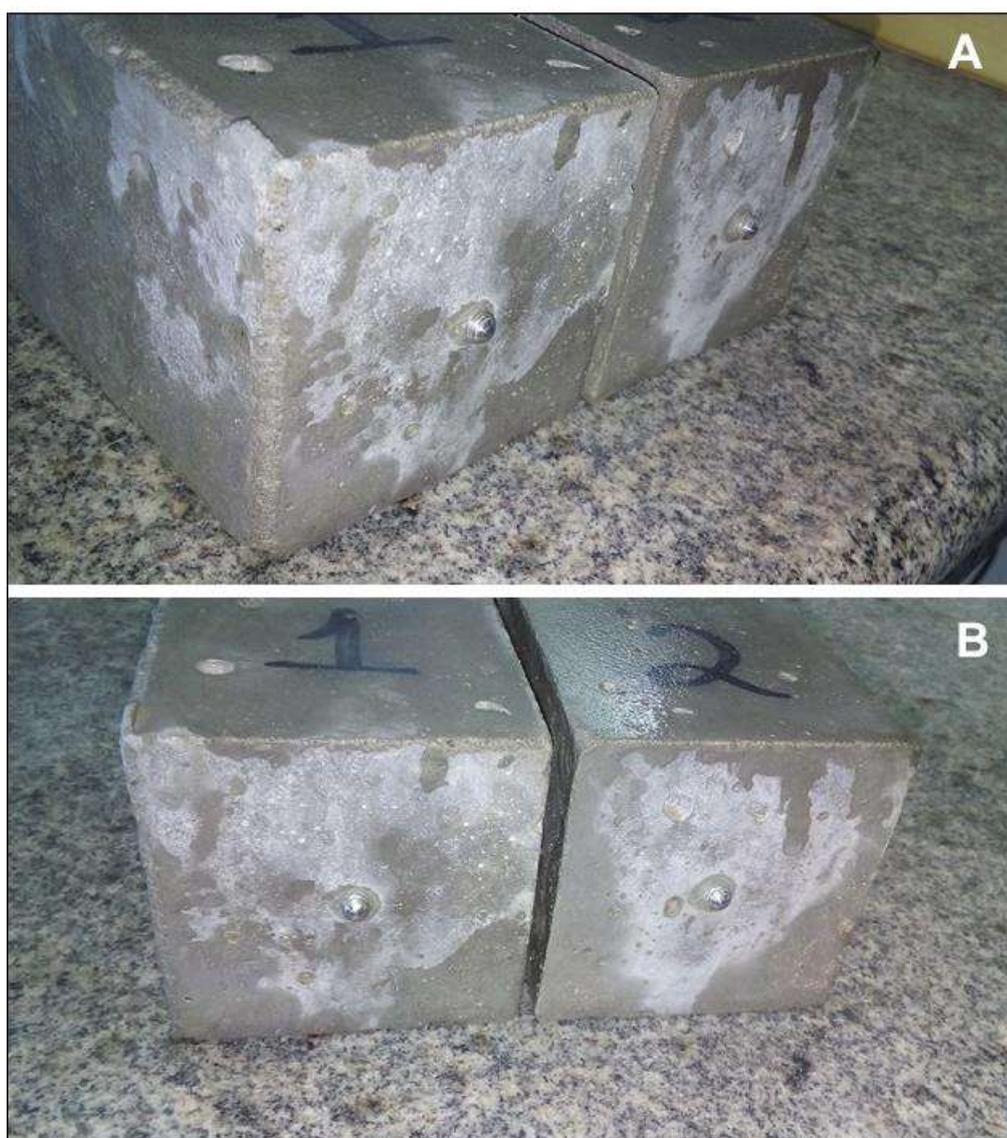


Fonte: Elaboração própria

3.3.4.4 Retração por secagem

Para a verificação da retração por secagem dos concretos foram seguidas as recomendações da ASTM C 157 (ASTM, 2014). O ensaio consistiu na moldagem de corpos de prova prismáticos com dimensões de 7x7x28 cm, em cada extremidade foi inserido um pino metálico, estes pinos serviram de suporte para as medições (Figura 11).

Figura 11 – Pinos metálicos inseridos no corpo de prova



Fonte: Elaboração própria

Foram realizadas medições para que fosse possível medir a variação do comprimento ao longo do tempo. Essas leituras aconteceram ao 1, 4, 7, 14, 28, 56, 112 e 224 dias.

O ensaio foi iniciado com a inserção do medidor digital ao aparato utilizado para posicionar o corpo de prova e este ser medido. Com a haste do equipamento, foi zerado o medidor tomando seu comprimento na idade requerida. A Figura 12A mostra o aparato utilizado e na Figura 12B mostra o conjunto de medição com o corpo de prova posicionado.

Figura 12 – Ensaio de retração, (A) equipamento de medição, (B) corpo de prova posicionado.



Fonte: Elaboração própria

4 RESULTADOS

O item 4.1 apresenta os resultados da massa específica dos concretos no estado fresco. Os itens 4.2 e 4.3 apresentam os resultados dos ensaios mecânicos dos concretos em estudo, o item 4.4 mostra os resultados do ensaio de retração por secagem.

4.1 Massa específica do concreto

A tabela 14 mostra os resultados de massa específica do concreto no estado fresco, para o concreto de referência, com 10% de substituição e 15 % de substituição de agregado miúdo por reciclado de PET.

Tabela 14 – Resultado da massa específica dos concretos

Traços	Massa específica (kg/m³)
Referência	2451,18
10% PET	2414,30
15% PET	2387,54

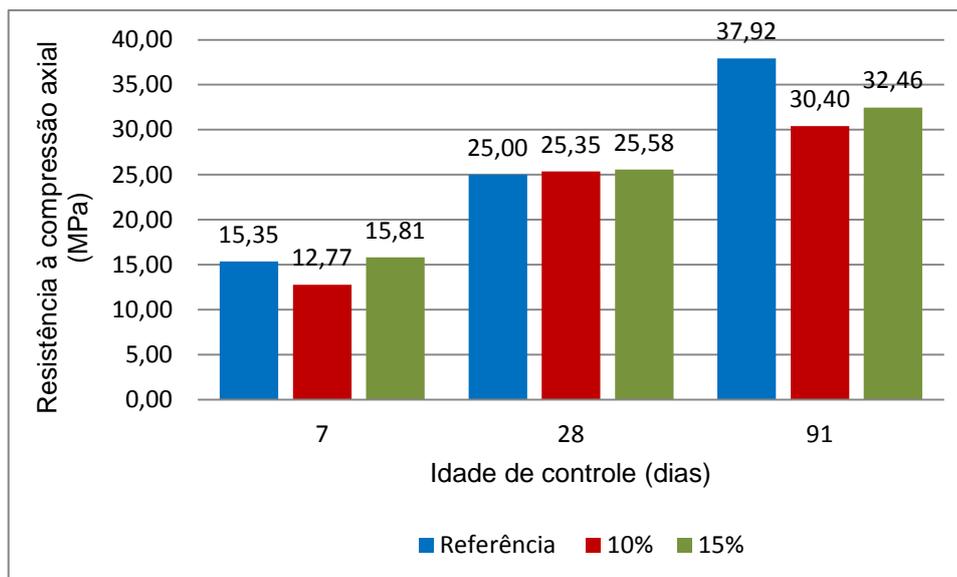
Fonte: Elaboração própria

Os resultados obtidos mostram uma tendência da redução da massa específica dos concretos com o aumento do teor de PET nas misturas. O concreto com 10% de substituição de PET apresentou uma diminuição de 1,5% em relação ao concreto de referência, e o concreto com substituição de 15% de PET apresentou uma diminuição de 2,6%. Pode-se concluir que a diminuição de massa específica está relacionada com o aumento do teor de substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de PET, já que este possui massa específica menor que a areia natural.

4.2 Resistência à compressão

O Gráfico 7 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de resistência à compressão axial dos concretos investigados para as idades de controle de 7, 28 e 91 dias.

Gráfico 7 – Resultado dos ensaios de compressão nos concretos estudados



Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 7 mostra que os três traços de concreto apresentaram um aumento da resistência à compressão axial com a variação da idade de controle, como o esperado. Para as idades de controle de 7 e 28 dias, o concreto com teor de 15% de PET apresentou os melhores resultados de resistência à compressão axial entre os traços investigados. Aos 91 dias, este concreto apresentou resultado de resistência à compressão axial superior ao concreto com teor de 10% de PET, porém inferior ao do concreto de referência.

O concreto com 10% de PET apresentou uma resistência à compressão axial inferior ao concreto de referência aos 7 dias. Aos 28 dias exibiu um resultado um pouco superior ao da mistura de referência, mas inferior ao do concreto com 15% de PET. Por fim, na idade de 91 dias apresentou a menor resistência entre os traços investigados.

A Tabela 15 mostra em porcentagem, os valores de resistência que os concretos estudados alcançaram. O concreto de referência foi utilizado como parâmetro, assim sua resistência foi definida como 100%, os demais concretos que foram feitos com substituição de agregado natural por areia de PET apresentam resistências comparadas ao concreto de referência.

Tabela 15 – Resultados comparativos entre as resistências dos concretos estudados

Traços	7 dias	28 dias	91 dias
Referência	100%	100%	100%
10% PET	83,19%	101,40%	80,17%
15% PET	102,99%	102,32%	85,60%

Fonte: Elaboração própria

Ao analisar a Tabela 15 pode se observar que o concreto com substituição de 10% de PET superou o concreto de referência somente na idade de 28 dias. Nas idades de 7 e 91 dias o concreto com 10% de PET alcançou um percentual de 83,19% e 80,17% da resistência do concreto de referência, respectivamente. Observa-se que mesmo não ultrapassando os resultados dos concretos de referência (Gráfico 7), as misturas atingiram a resistência de dosagem, estabelecida em 25 MPa aos 28 dias.

O concreto com 15% de PET atingiu resultados superiores, mas muito parecidos aos de referência (Gráfico 8), e aos 91 dias teve uma queda na resistência atingindo 85,60% da resistência do concreto de referência (Tabela 15), mas ainda superando a resistência de controle (25 MPa). São necessários novos estudos para comprovar se esse comportamento pode estar associado a algum tipo de degradação do PET na mistura cimentícia com o passar do tempo.

Para determinar a real influência dos teores de substituição de agregado reciclado de PET na resistência à compressão axial dos concretos, os resultados foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA). A análise foi realizada através do Programa Statistica Release 7.0 e tem como propósito definir se existem diferenças significativas entre as médias e se alguma das variáveis apresenta real influência nos resultados. A Tabela 16 apresenta os resultados de variância (ANOVA).

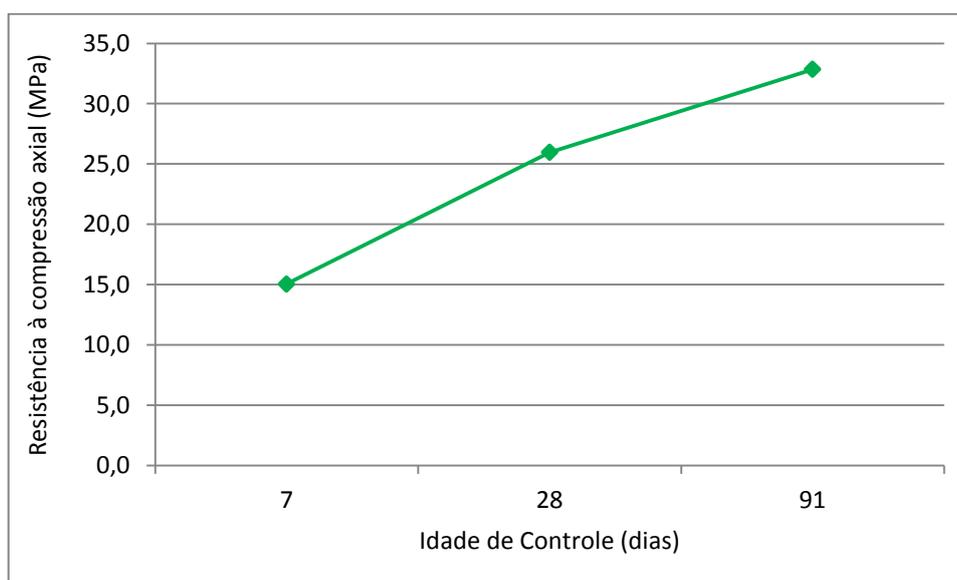
Tabela 16 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de compressão axial

	SS	Degr. Of	MS	F	p	Significância
Intercepto	16368,60	1	16368,60	975,5394	0,000000	-
Teor de PET	57,41	2	28,71	1,7108	0,208819	NÃO
Idade	1450,95	2	725,48	43,2370	0,000000	SIM
Teor de PET * Idade	14,10	4	3,52	0,2101	0,929463	NÃO
Erro	302,02	18	16,78			

Fonte: Elaboração própria

As variáveis só se mostram estatisticamente significativas quando o valor de “p” é menor que 0,005, indicando que podem chegar a um percentual 95% de confiança. A Tabela 16 mostra que a variável “Teor de PET” e a interação das variáveis “Teor de PET x Idade” não se mostraram significativas ($p > 0,005$). Os resultados da ANOVA permitem concluir que as substituições estudadas (10%, 15%) não interferiram nos resultados de resistência à compressão axial. Ou seja, matematicamente não existe diferença entre os resultados do concreto de referência e os concretos com incorporação de PET. Entre as variáveis estudadas, somente a “Idade” se mostrou significativa ($p < 0,005$), indicando interferência nos resultados. O Gráfico 8 mostra o comportamento da resistência média à compressão axial com a variação do tempo.

Gráfico 8 – Resistência média à compressão nas idades de controle



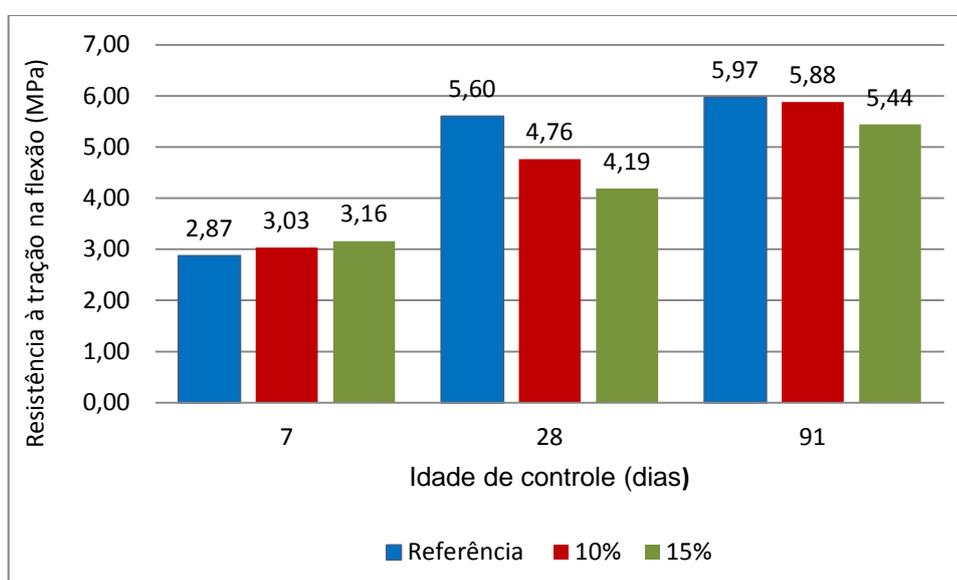
Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 8 mostra a tendência de crescimento da resistência à compressão axial com o aumento de idade dos concretos.

4.3 Resistência à tração na flexão

O Gráfico 9 mostra os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração na flexão para os concretos de referência e os com substituição de agregado miúdo natural por agregado reciclado de PET, nas idades de 7, 28 e 91 dias.

Gráfico 9 – Resultado dos ensaios de tração na flexão nos concretos estudados



Fonte: Elaboração própria

De acordo com o Gráfico 9, o concreto de referência apresentou maior resistência à tração na flexão do que os demais concretos nas idades de 28 e 91 dias. Para essas mesmas idades, o concreto com substituição parcial de 10% de PET apresentou melhores resultados do que o concreto com substituição de 15% de PET. Aos 91 dias pode-se observar que a diferença de resistência à tração na flexão dos concretos com PET é pequena (de aproximadamente 7%).

A Tabela 17 mostra em porcentagem, os valores de resistência que os concretos estudados alcançaram. O concreto de referência foi utilizado como parâmetro, assim sua resistência à tração na flexão foi definida como 100%, os demais concretos que foram feitos com substituição de agregado natural por areia de PET apresentam resistências comparadas ao concreto de referência.

Tabela 17 – Resultados comparativos entre as resistências dos concretos estudados

Traços	7 dias	28 dias	91 dias
Referência	100%	100%	100%
10% PET	105,57%	85%	98,49%
15% PET	110,10%	74,82%	91,12%

Fonte: Elaboração própria

Ao analisar a Tabela 17 observa-se que, somente na idade de 7 dias, os concretos com PET ultrapassaram o concreto de referência. Na idade de 28 dias, o concreto que apresentou menor resistência à tração na flexão, comparado com o concreto de referência foi o concreto com 15% de PET. Na idade de controle de 91 dias, ambos os concretos (10% e 15% de PET) apresentaram resultados próximos ao da mistura de referência, alcançando 98,49% e 91,12% da resistência do concreto de referência, respectivamente. O aumento de resistência pode ser associado a melhor hidratação do cimento, ocorrido com o passar do tempo.

Os resultados de resistência à tração na flexão também foram submetidos à análise de variância ANOVA, através do programa Statistica Release 7.0. A Tabela 18 apresenta os resultados de variância (ANOVA).

Tabela 18 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de tração na flexão

	SS	Degr. Of	MS	F	p	Significância
Intercepto	538,1747	1	538,1747	2374,371	0,000000	-
Teor de PET	0,5578	2	0,2789	1,231	0,315565	NÃO
Idade	29,3225	2	14,6612	64,684	0,000000	SIM
Teor de PET * Idade	0,4679	4	0,1170	0,516	0,724875	NÃO
Erro	4,0799	18	0,2267			

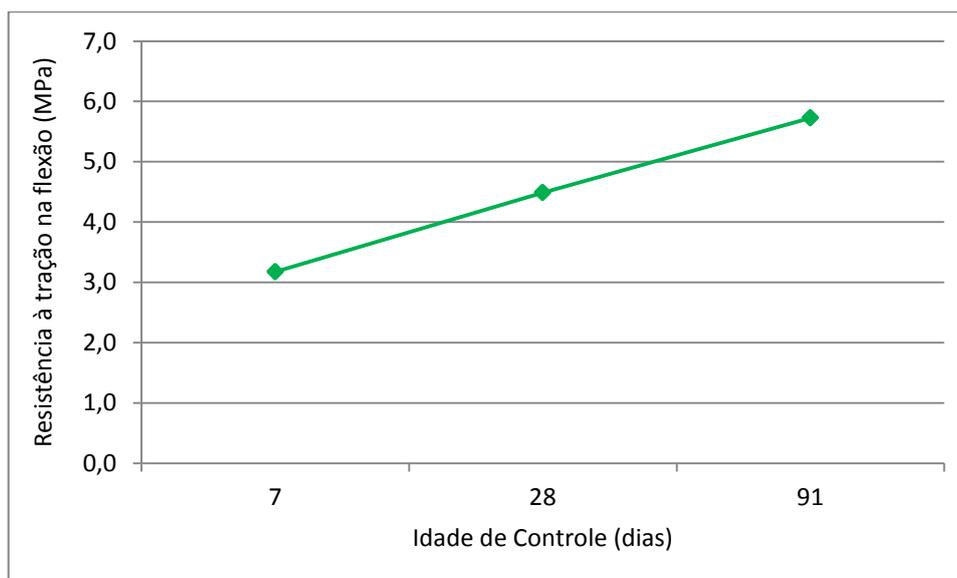
Fonte: Elaboração própria

Os resultados da ANOVA mostram que somente a variável “Idade” foi significativa ($p < 0,005$). Ou seja, matematicamente não existe diferença entre os resultados de resistência à tração na flexão das amostras do concreto de referência e dos concretos com substituição de 10% e 15% de PET. Observa-se uma tendência de redução da resistência à tração na flexão com o aumento do teor de PET (Gráfico

9), mas a análise de variância demonstrou que essa diferença é desconsiderável matematicamente.

O Gráfico 10 mostra os resultados de resistência à tração na flexão com o passar do tempo.

Gráfico 10 – Resistência média à tração na flexão nas idades de controle



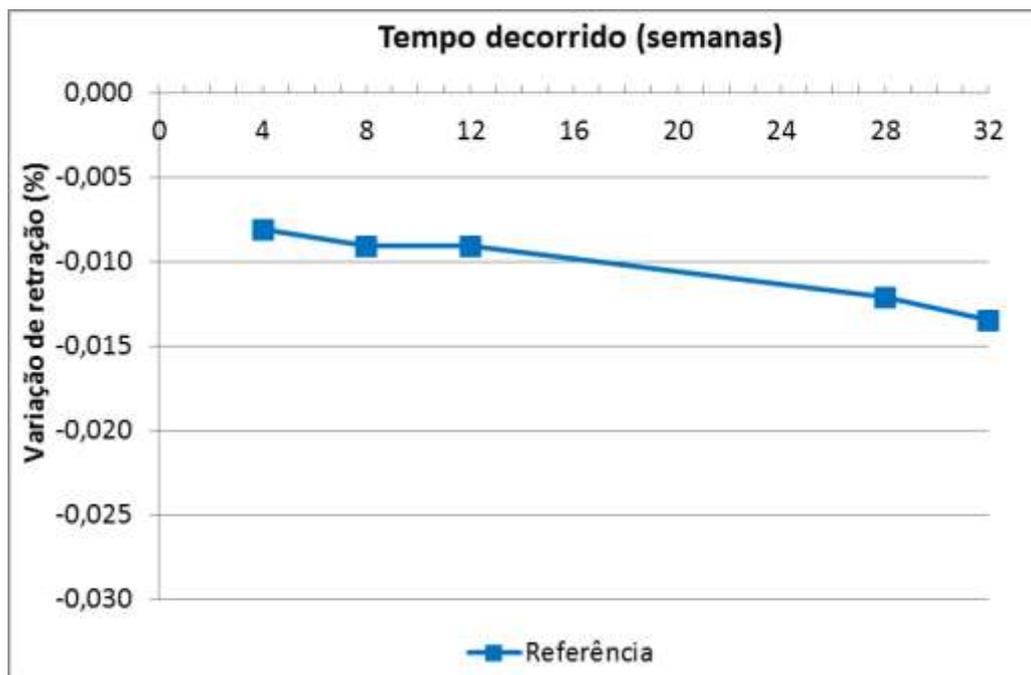
Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 10 apresenta uma tendência de crescimento da resistência à tração na flexão com a variação da idade de controle dos ensaios, este crescimento se deve a cura correta do concreto, que foi feita em câmara úmida com umidade controlada acima de 95%. Conforme Bauer (2001) entende-se por cura do concreto um conjunto de medidas que têm por objetivo evitar a evaporação da água utilizada na mistura do concreto, esta água que reage com o cimento, hidratando-o. Este processo favorece a resistência mecânica à ruptura.

4.4 Retração por secagem

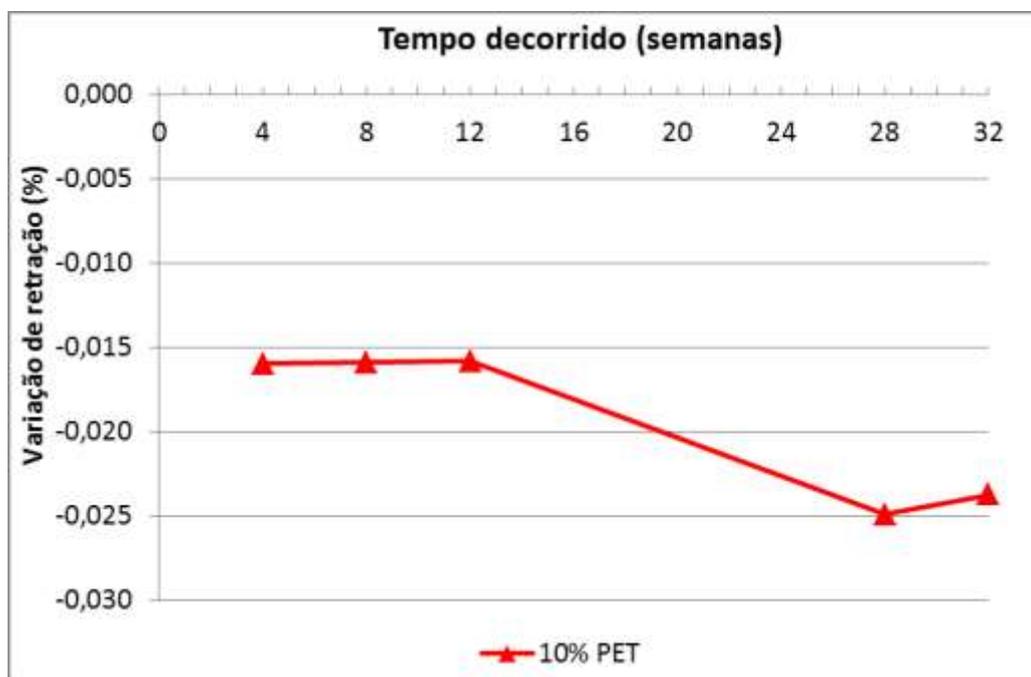
Os resultados para retração com o concreto de referência, concreto com substituição de 10% de PET e 15% de PET estão apresentados nos Gráficos 11, 12 e 13, respectivamente.

Gráfico 11 – Variação da retração no concreto de referência



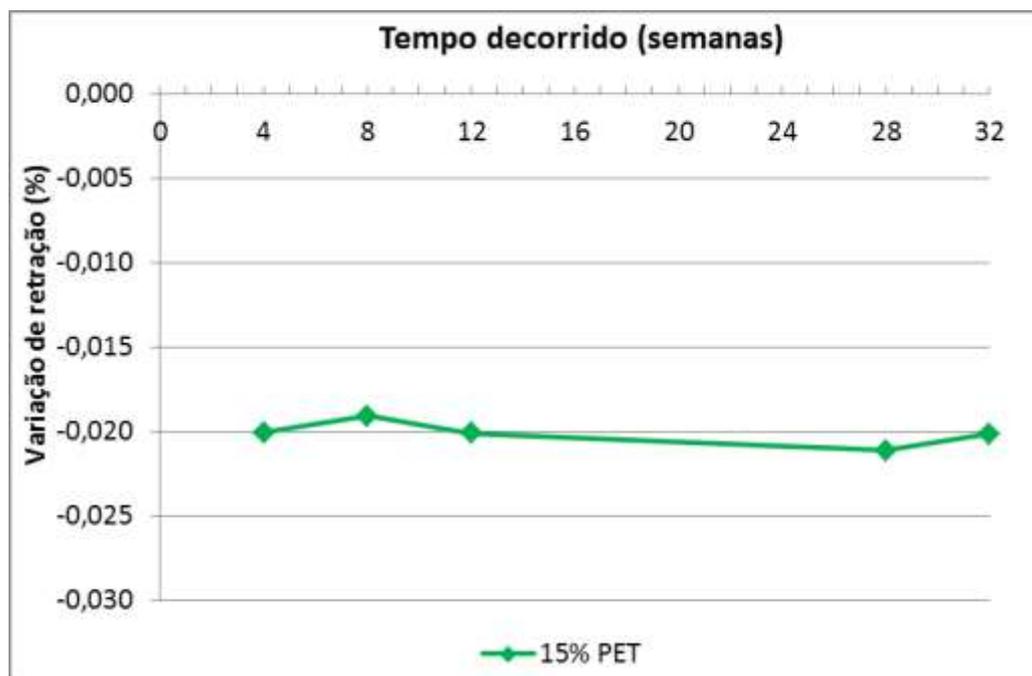
Fonte: Elaboração própria

Gráfico 12 – Variação da retração no concreto com 10% de PET



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 13 – Variação da retração no concreto com 15% de PET

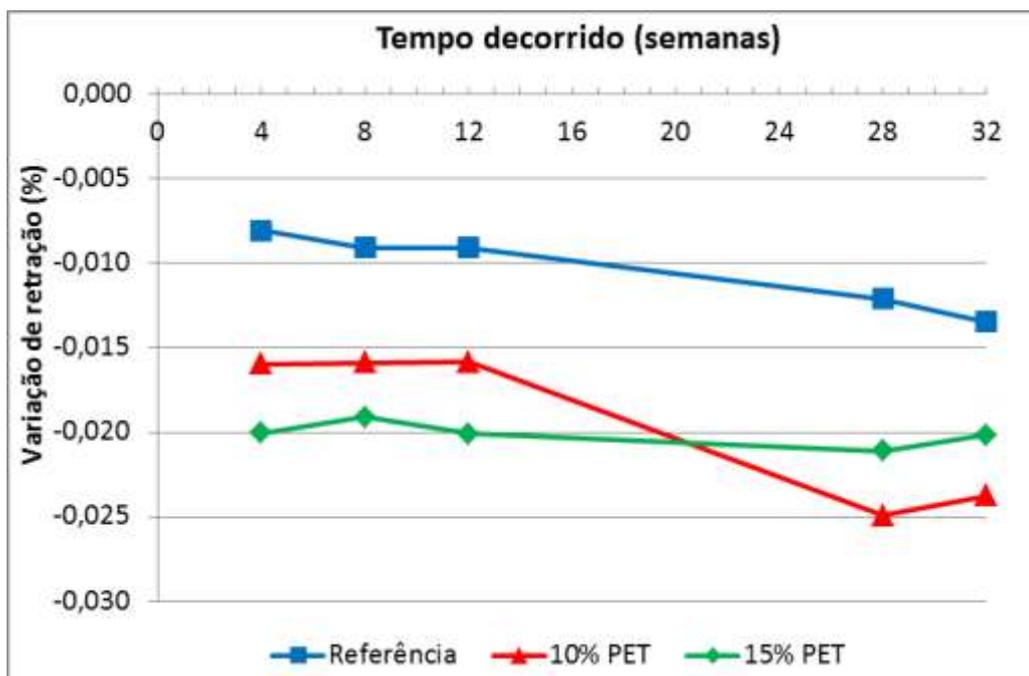


Fonte: Elaboração própria

No Gráfico 11 observa-se que o concreto de referência retraiu a partir da 4ª semana, mantendo o mesmo volume até a 8ª semana e apresentou retração maior a partir da 12ª semana. No gráfico 12 pode-se ver que o concreto com 10% de substituição de PET manteve o mesmo volume até a 12ª semana, tendo uma retração significativa até a 28ª semana e aumentando um pouco seu volume até a 32ª semana. O Gráfico 13 mostra a retração do concreto com 15% de areia de PET, o concreto teve um pequeno aumento de volume até a 8ª semana, após esse período teve retração até a 28ª semana, e depois disso um pouco de aumento de volume até a 32ª semana.

O Gráfico 14 mostra os resultados de retração por secagem dos concretos investigados.

Gráfico 14 – Resultados de retração por secagem nos concretos investigados.



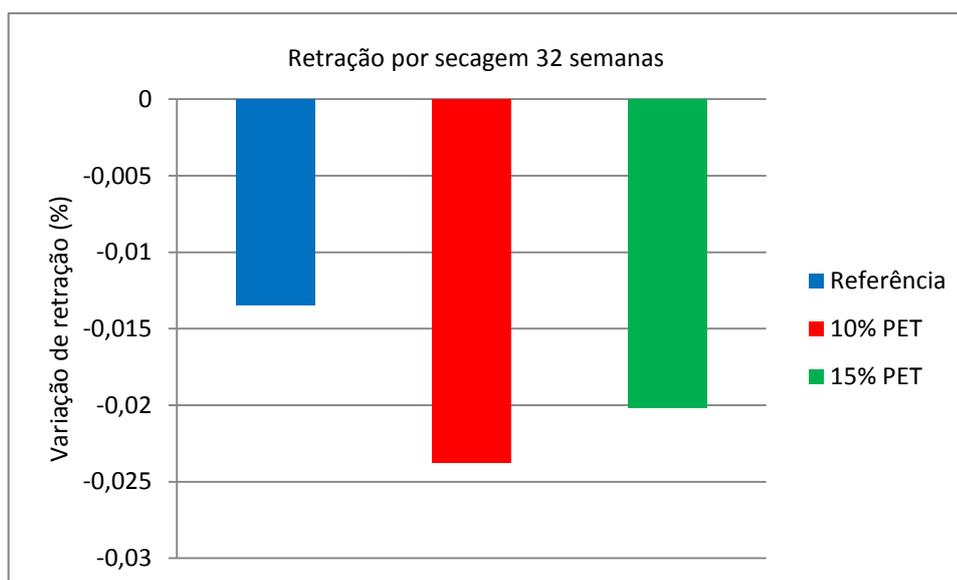
Fonte: Elaboração própria

Ao analisar o Gráfico 14, podemos ver o comportamento dos concretos investigados, e assim compararmos os resultados de retração de um concreto com o outro. Pode-se observar que apenas o concreto com 15% de PET teve um aumento de volume na 8ª semana, e que todos os concretos tiveram a maior retração no período da 12ª semana até a 28ª semana, onde após esse período os concretos com substituição de PET apresentaram aumento de volume até a última leitura com 32 semanas.

Ao verificar somente as maiores variações, temos que o concreto de referência obteve sua maior variação na 32ª semana, assim obtendo sua maior retração. O concreto com 10% e 15% se PET tiveram suas maiores variações na 28ª semana, tendo esses últimos dois concretos um aumento pequeno de volume até a última leitura.

O Gráfico 15 mostra o resultado da última leitura realizada.

Gráfico 15 – Resultados de retração na 32ª semana



Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 15 mostra que o concreto que teve a menor variação de retração por secagem foi o concreto de referência, atingindo 0,0135% de diminuição de volume, enquanto o concreto com 10% atingiu 0,0238% e o concreto com 15% de PET atingiu 0,0202% de retração.

Pensando na aplicabilidade destes concretos, o concreto de referência ao final das leituras, com 32 semanas, retraiu 0,038 mm, comparando com seu comprimento inicial de 285 mm. O concreto com 10% de PET retraiu 0,068 mm e o concreto com 15% de PET retraiu 0,058 mm. Caso esses traços de concreto sejam utilizados para a construção civil, em vigas de 4 metros, teremos uma retração de 0,54 mm para o concreto de referência, enquanto o concreto com 10% de PET irá ter uma diminuição de 0,95 mm e o concreto com 15% de PET uma diminuição de 0,81 mm.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Ao analisar a massa específica dos concretos investigados, pode-se concluir que com o aumento do teor de substituição há a diminuição do peso específico, fazendo com que o concreto com areia de PET se torne mais leve. Com relação ao abatimento, concluiu-se que a variação do teor de PET nas misturas tornou os concretos menos trabalháveis, corroborando com os resultados de Jardim (2016).

Verificando as propriedades mecânicas, resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão, em um primeiro momento percebe-se uma diminuição das propriedades mecânicas estudadas com o aumento de teor de PET nas misturas. Porém os resultados de uma análise estatística (ANOVA) mostraram que somente a variável "Idade" foi significativa ($p < 0,005$). Ou seja, matematicamente não existe diferença entre os resultados de resistência à compressão axial e à tração na flexão das amostras do concreto de referência e dos concretos com substituição de 10% e 15% de PET. A substituição de agregado miúdo natural por agregado reciclado de PET não interferiu nas propriedades mecânicas das misturas investigadas.

Os resultados de retração do concreto mostraram que o concreto de referência foi o que obteve menor retração, porém os concretos com substituições não apresentaram valores altos de retração, nem obtiveram comportamento muito diferentes do concreto de referência.

Em suma, pode-se concluir que, para este trabalho, a utilização de agregado reciclado de PET é viável, já que a substituição não trouxe prejuízo ao concreto no que se refere a resistência à compressão axial, resistência à tração e retração por secagem. Sugere-se que novos estudos sejam realizados para que os resultados dessa pesquisa sejam validados e que para que novas propriedades dos concretos sejam estudadas. O uso do agregado de PET em concretos parece ser promissor, principalmente no que tange a questão ambiental.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para a continuidade deste trabalho e melhor definição de viabilidade de substituição de agregado natural por agregado reciclado de PET, sugere-se:

- Ampliar o estudo das propriedades de durabilidade do concreto;
- Estudar maior variação de teores de substituição de PET;
- Estudar o uso de aditivos e relação a/c para obter concretos de maior resistência;
- Estudar as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos com diferentes teores de PET em idades superiores à 91 dias, objetivando a verificar a degradação do PET pela alcalinidade da mistura.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos do Brasil 2015**. 2015. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br>>. Acesso em: 26 de abr. de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA DO PET – ABIPET. **Panorama: Indústria do PET no Brasil**. 2013. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/uploads/File/Market%20Overview%202013.pdf>>. Acesso em: 02 de mai. de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA DO PET – ABIPET. **10º CENSO da Reciclagem de PET**. 2015. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>>. Acesso em: 02 de mai. de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA DO PLÁSTICO – ABIPLAST. **Perfil 2015**. 2015. Disponível em: <http://file.abiplast.org.br/download/2016/perfil_2015_ok.pdf>. Acesso em: 17 de mai. de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA DO PLÁSTICO – ABIPLAST. **Preview Perfil 2016**. 2015. Disponível em: <http://file.abiplast.org.br/file/noticia/2017/folder_preview_perfil2016_separado.pdf>. Acesso em: 21 de mai. de 2017.

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

_____ - ABNT. **NBR NM 53**: Agregado Graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

_____ - ABNT. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____ - ABNT. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____ - ABNT. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____ - ABNT. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____ - ABNT. **NBR 7211**: Agregados para Concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____ - ABNT. **NBR NM 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____ - ABNT. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____ - ABNT. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____ - ABNT. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento Rio de Janeiro, 2015.

_____ - ABNT. **NBR 13230**: Simbologia identificativa de reciclabilidade e identificação de materiais plásticos - procedimento. Rio de Janeiro, 2010.

ALENCAR, M. M. M. Reciclagem de lixo numa escola pública do município de Salvador. **Revista Candombá**. Salvador, p. 96-113, jul. 2005.

ALMEIDA, M.O. et al. **Uso de areia de PET na fabricação e concretos**. Florianópolis, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C157/C157M – 08**: Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete, 2008.

ANEPAC- Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção. **O Mercado de agregados no Brasil**. São Paulo, 2015.

ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. Rio Grande, Dunas, 2010, v. 1, 3ª edição.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro, LTC, 2001. 471 p. 5ª edição.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2010.

BUTTLER, A. M. et al. **Blocos estruturais de concreto com agregados reciclados de concreto – Caracterização das propriedades físicas**. IX Encontro Nacional de Tecnologia do ambiente construído. Florianópolis, 2006.

CABRAL, A. E. B. et al. Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. **Cerâmica**. São Paulo, vol. 55, p. 448-460, 2009.

CALCADO, G. C.S. **Influência da adição de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho de argamassas de cimento Portland**. Rio de Janeiro, 2015.

CANELLAS, Susan Sales. **Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassas**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais

e Metalurgia), 2005, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM – CEMPRE. **Review 2015**. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/artigos>>. Acesso em: 29 de abr. de 2017

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM – CEMPRE. **Radiografando a coleta seletiva**. 2016. Disponível em: <<http://cempre.org.br/ciclosft/id/8>>. Acesso em: 29 de abr. de 2017

CNP Reciclagem. **Um planeta melhor para você**. 2015. Disponível em: <http://www.cnpreciclagem.com.br/index_arquivos/Page540.htm>. Acesso em: 20 de junho de 2017.

GONÇALVES, R. D. C. **Influência da adição de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho de argamassas de cimento Portland**. Dissertação de mestrado. USP, São Carlos, 2001.

GOUVEIA, N. Resíduos Sólidos Urbanos. **Ciência e Saúde Coletiva**. São Paulo, p. 1503-1510, abr. 2012.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Org). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2010. P. 905 – 944.

HOJO, L. Y. C. P.; MARTINS. C. H. **Utilização da substituição parcial do cimento por cinza leve do bagaço de cana-de-acúcar em concretos**. 2015.

HOPEWELL, J., DVORAK, R., KOSIOR, E. **Plastics Recycling: Challenges and Opportunities**. Austrália, 2009.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos Avançados**. São Paulo, vol. 25, n. 71, p. 135-158, fev. 2011.

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. UNIPAMPA, Alegrete, 2016.

LACERDA, C. S.; HELENE, P. R. L. **Estudo da influência da substituição de cimento Portland por metacaulim em concretos**. São Paulo, EPUSP, 2005.

NETO, G. T. B. **Substituição de agregados miúdos naturais por britados em concretos**. Dissertação de mestrado. UFPR, Curitiba, 2006

OLIVEIRA, M. C. B. R. **Gestão de resíduos plásticos pós consumo: Perspectivas para a reciclagem no Brasil**. Dissertação de mestrado. UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

PADOIN, D. G. **Estudo das propriedades mecânicas e físicas de um traço comercial de concreto autoadensável com e sem substituição de cinza de casca de arroz.** Dissertação de mestrado. UNIPAMPA, Alegrete, 2017.

PANDOLFI, M. P. **Estudo do uso de resíduos da construção civil em concreto para pavimentação.** Trabalho de conclusão de curso. UNIPAMPA, Alegrete, 2016.

PIETROBELLI, R. Eliton. **Estudo de viabilidade do Pet reciclado em concreto sob aspecto da resistência a compressão.** 2010. 71 f. Monografia apresentada Universidade Comunitária Regional de Chapecó para o grau de bacharel em Engenharia Civil.

PINHEIRO, L. M.; Muzardo C. D.; SANTOS, S. P. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios.** São Carlos: Edufscar, 2004.

SANTOS, R. et al. **Usinas de compostagem de lixo como alternativa viável à problemática dos lixões no meio urbano.** Minas Gerais, 2006.

SCOBAR, R. L. **Concreto leve estrutural: substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida.** Trabalho de conclusão de curso. UTFPR, Campo Mourão 2016.

SILVA, A. L. B. et al. **Concreto especial produzido a partir da substituição parcial do cimento portland por resíduos de vidro.** IX Congresso de Iniciação Científica do IFRN. Rio Grande do Norte, 2012.

SILVA, R. K. **Influência da substituição parcial de agregados de RCD classe cinza em concretos autoadensáveis.** Trabalho de conclusão de curso. UNIPAMPA, Alegrete, 2015.

SPINACÉ, M. A. S; DE PAOLI, M. A. A Tecnologia da Reciclagem de Polímeros. **Quim. Nova.** Campinas, vol. 28 , n. 1, p. 65-72, nov. 2004.

TONUS, C. A; MINOZZI P. I. **Utilização de agregados reciclados de alvenaria na produção de concreto para contrapisos.** Trabalho de conclusão de curso. UTFPR, Pato Branco, 2013.

VAZ, C. E. **Avaliação de desempenho de argamassa modificada: com areia de PET.** Trabalho de conclusão de curso. UNIPAMPA, Alegrete, 2016.