

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

NATÁLIA BRAGA DE MOURA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO
MIÚDO NATURAL POR RESÍDUO DE PET NA FABRICAÇÃO DE CONCRETO
LEVE**

**Alegrete
2017**

NATÁLIA BRAGA DE MOURA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO
MIÚDO NATURAL POR RESÍDUO DE PET NA FABRICAÇÃO DE CONCRETO
LEVE**

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.

Orientador: Simone Dornelles Venquiaruto

**Alegrete
2017**

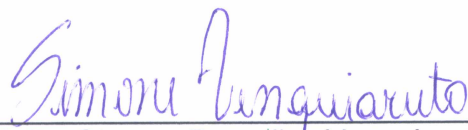
NATÁLIA BRAGA DE MOURA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO
MIÚDO NATURAL POR RESÍDUO DE PET NA FABRICAÇÃO DE CONCRETO
LEVE**

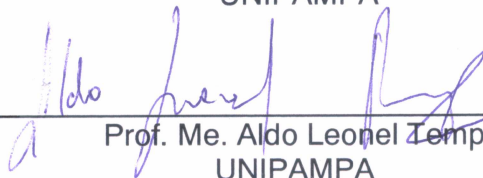
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

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

Banca examinadora:



Prof. Dr. Simone Dornelles Venquiaruto
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Me. Aldo Leonel Temp
UNIPAMPA



Eng. Me. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira
UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre ter saúde e força para seguir em busca dos meus objetivos.

À minha família, por todo apoio e incentivo, em especial aos meus pais Rita e Eversom que com muito esforço e incentivo tornaram possível a minha caminhada até aqui, também ao meu irmão Vinicius que esteve sempre presente e principalmente nesta reta final.

Aos meus colegas e amigos conquistados ao longo da graduação, foram essenciais para a construção desta caminhada, dividindo muitos ensinamentos e sempre dispostos a me ajudar em qualquer situação. Em especial aos colegas que se tornaram verdadeiros amigos, uma convivência diária desde o início da graduação, foram muitos finais de semana juntos e um companheirismo essencial e decisivo na nossa formação. Aos amigos também conquistados já no fim da graduação, em pouco tempo se tornaram muito importantes e tiveram um papel muito significativo nesta trajetória.

Aos amigos de longe, que apesar da distância se mostraram sempre presentes. Em especial Manoela, Félix e Priscila, que inúmeras vezes transmitiram palavras de carinho e incentivo. Foram muitas conversas à distância dando um suporte tanto nas horas difíceis, quanto nas vitórias da vida acadêmica. Enfim, muita gratidão a esses amigos que há alguns ou muitos quilômetros pareciam estar aqui do lado. Minha amiga Priscila que saiu de Alegrete, mas deixou um pedaço dela aqui comigo sempre.

À minha orientadora Professora Simone, por todo conhecimento transmitido, ajuda e dedicação ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa Campus Alegrete que me auxiliaram na execução da pesquisa. Também aos funcionários da Universidade que se disponibilizaram a me ajudar em alguns serviços necessários à execução dos ensaios deste trabalho.

RESUMO

A construção civil é um setor que consome uma quantidade significativa de recursos naturais. Nesse contexto, observa-se a necessidade da busca por materiais alternativos que façam uso do reaproveitamento de resíduos na sua produção. Este trabalho tem como intuito a incorporação do resíduo de PET (politereftalato de etileno) na produção de concretos leves, ou seja, visa a produção de um concreto que reutiliza materiais, possuindo uma baixa densidade e que proporcione propriedades mecânicas e térmicas satisfatórias. Após adaptação de um traço de concreto leve já conhecido, desenvolveram-se três concretos leves com argila expandida: concreto leve de referência, contendo 100% de areia natural, concreto leve com substituição parcial de 15% do agregado miúdo natural por agregado reciclado de PET e concreto leve com substituição parcial de 30%. Foram estudadas algumas propriedades físicas (massa específica, índice de vazios e absorção de água) e mecânicas (resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão). Os concretos leves atingiram resistência à compressão superior a 17 MPa aos 28 dias, sendo classificados como concretos leves estruturais, de acordo com a NBR NM 35 (ABNT, 1995). Através de uma análise estatística, concluiu-se que para a resistência à compressão axial, matematicamente os três concretos apresentam mesma resistência, enquanto, para os valores de resistência à tração na flexão observou-se um acréscimo no concreto com substituição de 15% areia de PET. Avaliou-se também a condutividade térmica dos concretos leves, os quais apresentaram resultados satisfatórios quando comparados à norma nacional de desempenho térmico (NBR 15220/2005). As substituições não apresentaram perda de desempenho térmico em relação ao concreto referência.

Palavras-chave: Concreto leve, resíduo de PET, aproveitamento de resíduos, propriedades mecânicas, condutividade térmica.

ABSTRACT

Civil construction is a sector that consumes a significant amount of natural resources. In this context, it's necessary to search for alternative materials that make use of the reuse of waste in your production. This work aims the production of a new material that adds the incorporation of the PET residue in the production of lightweight concrete, that is, the production of a concrete that reuses materials, has a low density and that provides satisfactory mechanical and thermal properties. After the trace study, developed three lightweight concretes with expanded clay: reference lightweight concrete containing 100% natural sand, lightweight concrete with partial replacement of 15% of the natural aggregate by recycled aggregate PET and lightweight concrete with partial replacement of 30%. Some physical properties (density, water absorption and void index) and mechanical properties (compressive strength and tensile strength in flexion) were studied. The lightweight concretes reached compressive strength higher than 17 MPa at 28 days, being classified structural lightweight concretes, according to the NBR NM 35 (ABNT, 1995). Through an statistical analysis, mathematically the lightweight concretes have the same compressive strength, however, the values of tensile strength in flexion showed an increase for the concrete with 15% PET replacement. Also was evaluated the thermal conductivity, witch showed satisfactory results when compared to the national standard of thermal performance (NBR 15220/2005). The substitutions showed no loss of thermal performance in relation to the reference concrete.

Key-words: Lightweight concrete, PET waste, reuse of waste, mechanical properties, thermal conductivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes tipos de concretos leves: (a) com agregados leves, (b) celular e (c) sem finos.....	20
Figura 2 – Variações da massa específica de concretos produzidos com vários agregados leves.....	20
Figura 3 – Aspecto das argilas expandidas brasileiras Cinexpan 0500, Cinexpan 1506 e Cinexpan 2215	27
Figura 4 – Relação entre resistência à compressão e massa específica do concreto leve com argila expandida.....	29
Figura 5 – Influência da massa específica do concreto com argila expandida brasileira na condutividade térmica.....	33
Figura 6 – (a) Areia de PET; (b) Flake de PET.....	34
Figura 7 – Detalhamento do programa experimental	38
Figura 8 – Aspecto da argila expandida CINEXPAN 2215.....	40
Figura 9 – Curva granulométrica da argila expandida.....	41
Figura 10 – Ensaio de granulometria da argila expandida CINEXPAN 2215	42
Figura 11 – Curva granulométrica da areia natural	43
Figura 12 – Areia de PET	44
Figura 13 – Curva granulométrica da Areia de PET	45
Figura 14 – Argila expandida após imersão em água por 24 horas	47
Figura 15 – Mistura dos materiais	47
Figura 16 – Ensaio de abatimento.....	48
Figura 17 – Corpos de prova cilíndricos.....	49
Figura 18 – Ensaio de resistência à compressão axial	50
Figura 19 – Corpos de prova prismáticos.....	51
Figura 20 – Equipamento utilizado para o ensaio de condutividade térmica.....	51
Figura 21 – Placas de concreto para análise da condutividade térmica.....	52
Figura 22 – Ensaio de resistência à tração média na flexão: (A) Referência (B) 15 % PET, (C) 30% PET	61
Figura 23 – Micrografia (MEV) dos agregados miúdos com ampliação de 50 vezes: (A) areia de PET e (B) areia natural.....	62
Figura 24 – Micrografia (MEV) dos agregados miúdos com ampliação de 300 vezes: (A) areia de PET e (B) areia natural.....	62

Figura 25 – Corpo de prova prismático após ruptura por tração na flexão.....65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massas específicas de concretos leves	21
Tabela 2 – Resistência à compressão e massa específica	21
Tabela 3 – Tipos de Cimento Portland comercializados no Brasil.....	24
Tabela 4 – Características de alguns agregados leves comerciais.....	27
Tabela 5 – Relação entre resistência à compressão axial e resistência à tração (por compressão diametral e flexão) de concretos leves	31
Tabela 6 – Propriedades térmicas de concretos leves e concretos convencionais...	31
Tabela 7 – Valores de condutividade térmica de concreto com argila expandida	32
Tabela 8 – Propriedades do polímero Politereftalato de Etileno	34
Tabela 9 – Propriedades físico/químicas do cimento CPV ARI.....	39
Tabela 10 – Análise química do agregado leve, segundo informações do fabricante	40
Tabela 11 – Massa unitária e absorção de água da argila expandida 2215	40
Tabela 12 – Composição granulométrica da argila expandida 2215.....	41
Tabela 13 – Massa específica e massa unitária da areia natural.....	42
Tabela 14 – Composição granulométrica da areia natural	43
Tabela 15 – Composição granulométrica da areia de PET	44
Tabela 16 – Traço em massa do fabricante	45
Tabela 17 – Traço utilizado	46
Tabela 18 – Ensaio normativo dos concretos no estado endurecido.....	49
Tabela 19 – Massa específica dos concretos no estado fresco	53
Tabela 20 – Massa específica da amostra seca	54
Tabela 21 – Absorção de água	54
Tabela 22 – Variação da Absorção de água	55
Tabela 23 – Índice de vazios.....	55
Tabela 24 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão axial	57
Tabela 25 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência à tração na flexão.....	63
Tabela 26 – Valores de condutividade térmica dos concretos produzidos	65
Tabela 27 – Valores de condutividade térmica dos concretos produzidos.....	66
Tabela 28 – Valores de condutividade térmica NBR 15220 (ABNT, 2005)	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Valores médios de resistência à compressão axial	56
Gráfico 2 – Resistência à compressão axial média em função do teor de agregado reciclado para a idade de 28 dias	57
Gráfico 3 – Influência do teor de PET na resistência à compressão axial.....	58
Gráfico 4 – Resistência à compressão axial média nas idades de controle	59
Gráfico 5 – Resistencia à compressão axial em função massa específica dos concretos e seus índices físicos.....	60
Gráfico 6 – Valores médios de resistência à tração na flexão.....	61
Gráfico 7 – Influência do teor de PET na resistência à tração na flexão	64
Gráfico 8 – Resistência à tração média na flexão nas idades de controle	64
Gráfico 9 – Relação da condutividade térmica com a massa específica seca	66

LISTA DE SIGLAS

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

ABIPET: Associação Brasileira da Indústria do PET

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI: American Concrete Institute

ASTM: American Society for Testing and Materials

CDHU: Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano

CINEXPAN I. C. Ltda: Cinexpan Indústria e Comércio Ltda

CEB: Comité Euro-International du Béton

EESC: Escola de Engenharia de São Carlos

FIP: Fédération Internationale de la Précontrainte

LCC: Laboratório de Construção Civil

MEG: Monoetileno glicol

NBR: Norma brasileira

PET: Polietileno tereftalato

PTA: Ácido tereftálico purificado

USP: Universidade de São Paulo

LISTA DE ABREVIATURAS

γ : Massa específica

MPa : Mega Pascal

f_c : Resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos

f_{cu} : Resistência à compressão em corpos de prova cúbicos

kg/m³: Quilograma por metro cúbico

cal/g.°C: Calor específico

W/m.°K: Condutividade térmica

m²/h: Difusão térmica

10⁻⁶/°C : Expansão térmica

ρ : Massa específica

λ : Condutividade térmica

CPV ARI: Cimento Portland de alta resistência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1Objetivos	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2Objetivos Específicos	17
1.2Justificativa	17
1.3Estrutura do trabalho	18
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1Concreto leve	19
2.1.1 Classificação	19
2.1.2 Aplicações	22
2.2Principais componentes do concreto leve	23
2.2.1 Cimento Portland	23
2.2.2 Agregados Leves	24
2.2.2.1 Processo de Fabricação de Agregados Leves	26
2.2.2.2 Agregado Leve Argila Expandida	26
2.3Propriedades do concreto leve endurecido	27
2.3.1 Massa Específica	28
2.3.2 Resistência à Compressão Axial	28
2.3.3 Resistência à Tração	30
2.3.4 Propriedades Térmicas	31
2.3.4.1 Condutividade Térmica	32
2.4Agregado reciclado de PET	33
2.4.1 Politereftalato de Etileno	33
2.4.2 Materiais produzidos com resíduos de PET	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1Programa experimental	37
3.2Materiais	39
3.2.1 Cimento Portland	39
3.2.2 Argila expandida	39
3.2.3 Areia Natural	42

3.2.4 Agregado reciclado de PET	44
3.3Produção dos Concretos.....	45
3.3.1 Mistura dos materiais	46
3.4Ensaio de Controle do Concreto Endurecido	49
3.4.1 Massa específica, índice de vazios e absorção de água	50
3.4.2 Resistência à Compressão Axial	50
3.4.3 Resistência à Tração na Flexão.....	51
3.4.4 Condutividade Térmica	51
4 ANÁLISE E RESULTADOS	53
4.1Caracterização de propriedades físicas.....	53
4.1.1 Massa específica.....	53
4.1.2 Absorção de água e índice de vazios	54
4.2Caracterização das propriedades mecânicas.....	55
4.2.1 Resistência à compressão axial.....	55
4.2.2 Resistência à tração na flexão.....	60
4.3Avaliação da Condutividade Térmica.....	65
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
5.1Sugestões para trabalhos futuros	69
REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os resíduos sólidos produzidos nos meios urbanos atingem grandes proporções, tanto para efluentes líquidos quanto para os resíduos sólidos. Nesse sentido, Canellas (2015) comenta que a quantidade de resíduos domésticos produzidos no mundo cresceu três vezes mais do que a população nos últimos 30 anos. Ademais, o aumento da utilização de embalagens descartáveis, a cultura do consumo e o desperdício tem sido responsável pelo descarte de 30 bilhões de toneladas de resíduos sólidos no mundo todos os anos.

Observa-se contemporaneamente que a qualidade do ambiente, e de vida da população e dos animais pode ser modificada com a utilização de inovações científicas na produção de bens de consumo. Entretanto, para que isso ocorra, também é preciso que os resíduos produzidos tenham uma destinação e disposição final ambientalmente adequada.

Nesse contexto, encontra-se a construção civil, um dos setores produtivos que afeta significativamente o meio ambiente, com o consumo de recursos minerais e a produção de resíduos. Utiliza água, pedras, areias, calcário, zinco, alumínio, ferro, madeira, entre outros insumos. Tem como fornecedores os principais segmentos poluidores (PAIVA; RIBEIRO, 2005).

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, sendo basicamente constituído por cimento, água, areia e pedra, além de outros materiais eventuais, como os aditivos. No Brasil, o concreto produzido nas centrais dosadoras representa em torno de 30 milhões de metros cúbicos (LIMA et al., 2014).

O concreto estrutural leve é um material reconhecido em todo o mundo, possui aplicações em várias áreas da construção civil, como pontes, plataformas marítimas e edificações pré-fabricadas. O amplo uso desse material deve-se especialmente aos benefícios gerados pela redução da massa específica do concreto, como a redução de esforços nas edificações, a economia com formas de cimbramento, assim como a diminuição dos custos com transporte e montagem das edificações pré-fabricadas (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005).

Desse modo, a definição de concretos leves é a diminuição da massa específica através da presença de vazios, seja no agregado, na argamassa ou nos interstícios entre as partículas dos agregados graúdos. A presença desses vazios reduz a resistência do concreto leve quando comparado ao concreto convencional,

mas em algumas aplicações a alta resistência não é essencial. Cabe citar que amassa específica não deve ser superior a 1840 kg/m^3 , usualmente entre 1400 e 1800 kg/m^3 . (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Diante o exposto, a necessidade atual de obter novas maneiras a fim de manter a qualidade do meio ambiente desperta a procura da sociedade por novas formas de gerar produtos, que favoreçam o consumidor e que não poluam o meio ambiente. O uso de produtos a base de polietileno (PET) na construção civil é uma alternativa que está em ação, visando a redução dos resíduos produzidos pela construção civil (ARAGON; GHIRALDELLO, 2014).

Segundo a ABIPET (2012a), o mercado de PET é considerado recente, com aproximadamente 20 anos. No Brasil, a reciclagem de PET é uma das mais avançadas do mundo. Desse modo, apresenta um alto índice de reciclagem e várias aplicações, gerando uma demanda constante e garantida.

Apesar do alto índice de reciclagem, a parcela de PET que não pode ser reutilizada na indústria também é representativa. Logo, torna-se interessante buscar soluções alternativas para a incorporação desses rejeitos em outros setores, como o da construção civil, por exemplo.

Com base no exposto, o presente trabalho trata da viabilidade de produção de concreto leve utilizando areia de PET. Através da avaliação de propriedades mecânicas e condutividade térmica do concreto.

1.1 Objetivos

O objetivo geral e os objetivos específicos são apresentados nos próximos itens.

1.1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo verificar a viabilidade da utilização de agregado reciclado de PET na produção de concretos leves com argila expandida, através da substituição parcial do agregado miúdo natural por agregado reciclado de PET.

1.1.2 Objetivos Específicos

Avaliar a influência da substituição parcial de agregado miúdo natural por agregado reciclado de PET nas seguintes propriedades:

- Resistência à compressão axial de concretos (NBR 5739, 2007), nas idades de controle de 7 e 28 dias;
- Resistência à tração na flexão (NBR 12142, 1991), nas idades de controle de 7 e 28 dias;
- Condutividade térmica (NBR 15220, 2005), a partir da idade de controle de 28 dias.

1.2 Justificativa

Visto que a construção civil é um setor que consome significativamente recursos naturais e que diante do cenário ambiental se faz necessário a busca por alternativas que reduzam os impactos gerados, esta pesquisa aborda o estudo da incorporação da utilização de PET na produção de concretos leves.

Desse modo, se mostra importante, pois trata do desenvolvimento de um material que agrega a reutilização de materiais com a tecnologia do concreto leve. Envolve a produção de um concreto leve com presença de agregado reciclado, utilizando argila expandida como agregado graúdo leve e areia natural como agregado miúdo, sendo o agregado miúdo com substituição parcial de agregado reciclado de PET.

Conforme citam Rocha e Cheriaf (2003), a indústria da construção civil demonstra um amplo potencial para a solução dos impactos gerados à natureza, pela viabilidade que possui de incorporar os resíduos nos materiais de construção, viabilizando, ainda, a redução nos custos dos produtos da construção.

Neste estudo, além da inserção de um material reciclado na produção de concreto leve, é interessante observar que de acordo com Ferreira (2015) o concreto leve ao que se refere ao desenvolvimento sustentável pode ser considerado uma alternativa mais sustentável, visto que utiliza em sua mistura agregados alternativos aos usualmente empregados.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho está organizado em 5 capítulos, conforme especificados abaixo.

No Capítulo 1 são apresentados a contextualização da pesquisa, o objetivo geral, os objetivos específicos, a justificativa do trabalho e a descrição da estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 são abordados os conteúdos relevantes a este estudo, sendo o concreto leve, os principais componentes do concreto leve, as propriedades do concreto leve endurecido e o agregado reciclado de PET.

No Capítulo 3 descreve-se a metodologia utilizada no trabalho, onde são apresentados os materiais utilizados, os procedimentos de caracterização dos materiais e os ensaios de controle do concreto.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais e suas análises. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo divide-se em conceitos referentes ao concreto leve e ao agregado reciclado de PET. Dessa maneira, para o concreto leve são apresentadas definições, classificação e aplicações. A fim de caracterizar os concretos leves são apresentadas também as principais propriedades estudadas na pesquisa. Referente ao agregado reciclado de PET apresentam-se a definição, algumas propriedades e exemplos de materiais desenvolvidos para a construção civil utilizando PET.

2.1 Concreto leve

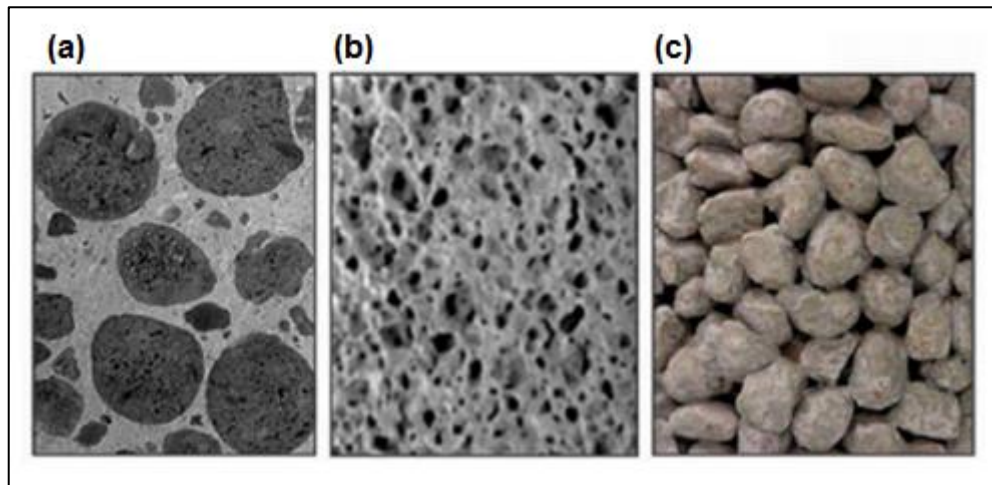
O concreto leve é caracterizado como um concreto que apresenta massa específica consideravelmente inferior ao concreto convencional. Na NBR 12655 (ABNT, 2015) consta a definição de concreto leve como concreto endurecido que, quando seco em estufa, apresenta massa específica superior a 800 kg/m^3 e inferior a 2000 kg/m^3 .

Devido ao preenchimento com ar dos vazios, o concreto leve apresenta bom isolamento térmico e uma durabilidade satisfatória, porém, não possui uma boa resistência à abrasão (NEVILLE; BROOKS, 2013).

2.1.1 Classificação

Segundo Rossignolo e Agnesini (2005), a diminuição da massa específica do concreto leve resulta da substituição de parte dos componentes sólidos do concreto por ar. Assim, o concreto leve pode ser classificado em concreto com agregados leves, concreto celular ou concreto sem finos, conforme mostrado na Figura 1.

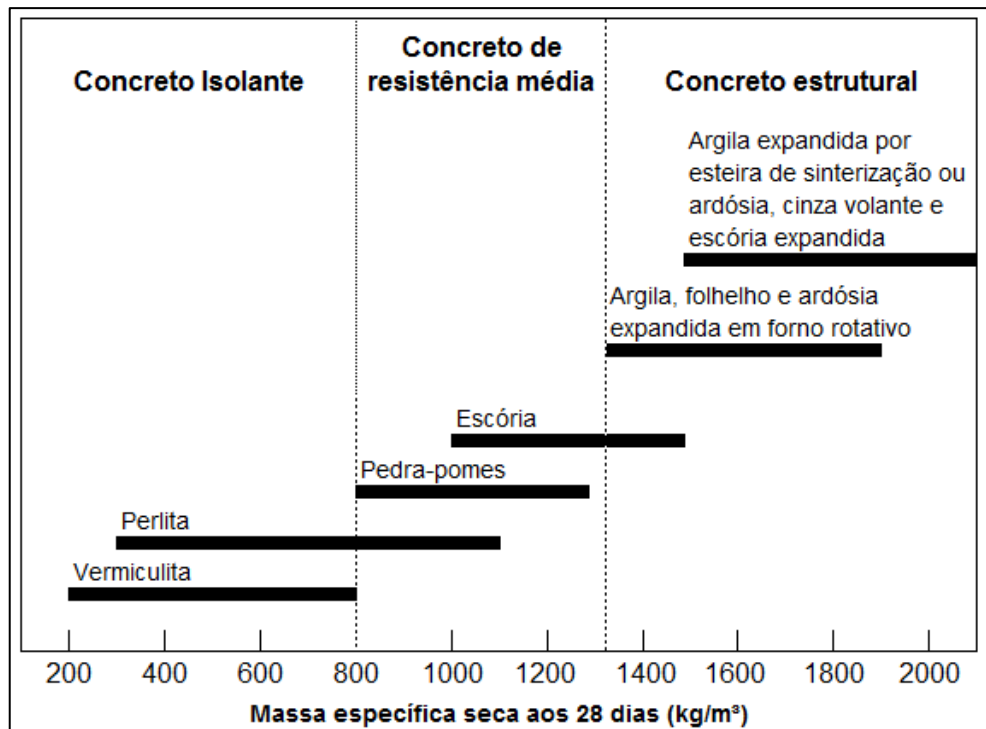
Figura 1 – Diferentes tipos de concretos leves: (a) com agregados leves, (b) celular e (c) sem finos



Fonte: Adaptado de Rossignolo (2009)

Os concretos leves podem ser divididos em concreto isolante, de resistência moderada e estrutural através da classificação ACI (Figura 2).

Figura 2 – Variações da massa específica de concretos produzidos com vários agregados leves



Fonte: Adaptado de Neville e Brooks (2013)

Neste trabalho é estudado o concreto leve com agregados leves, este tipo de concreto é usualmente aplicado para fins estruturais, sendo assim conhecido também como concreto leve estrutural. Os concretos leves estruturais são produzidos através da substituição parcial ou total dos agregados convencionais por agregados leves. Em geral, apresentam massa específica aparente abaixo de 2000 kg/m³, conforme pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1 – Massas específicas de concretos leves

Referência	Massa específica aparente (kg/m³)
NBR NM 35 (1995)	1680 < γ < 1840
ACI 213R-03 (2003)	1120 < γ < 1920

Fonte: Elaboração própria

A NBR NM 35 (ABNT, 1995) especifica limites de valores máximos de massa específica, e valores mínimos de resistência à compressão axial que os concretos leves devem respeitar, de acordo com a Tabela 2. Ainda especifica que os agregados leves miúdos utilizados devem possuir valores de massa unitária no estado seco e solto abaixo de 1120 kg/m³, enquanto os agregados leves graúdos abaixo de 880 kg/m³.

Tabela 2 – Resistência à compressão e massa específica

Resistencia à compressão aos 28 dias (MPa) (Valores mínimos)	Massa específica aparente (kg/m³) (Valores máximos)
28	1840
21	1760
17	1680

Fonte: NBR NM 35 (ABNT, 1995, p. 5)

De acordo com ACI 213R-03 (2003), os concretos leves estruturais são produzidos com agregados leves como especificado na ASTM C330-05 (ASTM, 2014), assim, devem apresentar uma resistência à compressão axial mínima de 17 MPa aos 28 dias e valores de massa específica conforme Tabela 1.

2.1.2 Aplicações

O concreto leve apresenta diversas aplicações na construção civil, entretanto, sua viabilidade técnica e econômica é maior em estruturas que apresentam o peso próprio como grande parte das solicitações, como edificações com múltiplos pavimentos e pontes, construções que envolvem transporte de componentes, como elementos pré-fabricados, e estruturas flutuantes, como tanques e plataformas (ROSSIGNOLO, 2009).

No Brasil, a utilização de concretos com agregados leves ainda é restrita, diante do potencial de utilização, concentrando-se no estado de São Paulo e em estados próximos, uma vez que a localização da fábrica de argila expandida Cinexpan em Várzea Paulista – SP. A maioria das aplicações dos concretos leves estruturais na construção civil nacional se refere a elementos pré-fabricados e em estruturas de edificações de múltiplos pavimentos moldado *in loco*, especialmente nas lajes (ROSSIGNOLO, 2009).

De acordo com Rossignolo (2009), destacam-se pesquisas, desde 2004, realizadas no Laboratório de Construção Civil (LCC) da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), referente ao desenvolvimento de concreto com argila expandida para aplicação em painéis de vedação vertical em concreto armado moldados *in loco*.

Os estudos desenvolvidos no LCC-EESC/USP englobaram o desenvolvimento de concreto leve e a avaliação da influência das características das vedações no desempenho térmico das habitações. Com relação ao desenvolvimento, destaca-se: trabalhabilidade adequada ao bombeamento e moldagem (*slump* acima de 150 mm); condições favoráveis de produção e cura; valores acima de 2 MPa para resistência à compressão às 12 horas de idade, favorecendo rápida desforma, e aos 28 dias acima de 30 MPa e massa específica aparente entre 1600 e 2000 kg/m³ aos 28 dias (ROSSIGNOLO; FERRARI, 2006). Relacionado ao desempenho térmico, avaliou-se a influência da espessura da vedação e da massa específica do concreto no conforto térmico das tipologias construídas pela CDHU, nas oito regiões bioclimáticas do Brasil. Assim, obtiveram-se valores ideais de espessura e massa específica do concreto para cada uma das regiões (SACHT, 2008; SACHT; ROSSIGNOLO, 2008a, 2008b; SACHT; ROSSIGNOLO; REZENDE NETO, 2008).

2.2 Principais componentes do concreto leve

2.2.1 Cimento Portland

O concreto de cimento Portland é o material de construção mais empregado no mundo. Isso se explica pelo fato de seus componentes serem fabricados de maneira relativamente fácil, utilizando matérias-primas locais, de modo que o concreto possui uma aplicação versátil (ROSSIGNOLO, 2009).

O cimento Portland é um pó fino que apresenta propriedades aglomerantes, aglutinantes e ligantes, que sob ação da água endurece (ABCP, 2002).

O cimento Portland é produzido através da pulverização de clínquer composto essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma proporção de sulfato de cálcio natural, podendo conter adições de certas substâncias que modificam as propriedades. Os elementos fundamentais do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃), certa proporção de magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO₃), que é acrescentado após a calcinação para retardar o tempo de pega do produto (BAUER, 2008).

Existem no Brasil diferentes tipos de cimento Portland que se diferem entre si, principalmente em função da sua composição. O mercado apresenta onze tipos básicos de cimento Portland, produzidos pela indústria brasileira. Na Tabela 3 estão apresentados os tipos de cimento, as nomenclaturas, os constituintes especificados em normas e as classes de resistência.

Tabela 3 – Tipos de Cimento Portland comercializados no Brasil

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolanas	Filler calcário
Comum	CPI	25,32,4	100		0	
Comum com adição	CPI-S	25,32,4	99-95		1-5	
Composto com Escória	CPII-E	25,32,4	94-56	6-34	0	0-10
Composto com Pozolanas	CPII-Z	25,32,4	94-76	0	6-14	0-10
Composto com Filler	CPII-F	25,32,4	94-90	0	0	6-10
Alto Forno	CPIII	25,32,4	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CPIV	25,32	5-45	0	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CPV-ARI	-	100-95	0	0	0-5
Resistente a Sulfatos	RS	25,32,4	-	-	-	-
Baixo Calor de Hidratação	BC	25,32,4	-	-	-	-
Branco Estrutural	CPB	25,32,4	-	-	-	-

Fonte: Kihara e Centurione (2005, p. 316)

Na produção de concretos leves é utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI). É definido pela NBR 5733 (ABNT, 1991) como aglomerante hidráulico que contempla as exigências de alta resistência inicial, obtido da moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte por silicatos de cálcio hidráulicos ao qual se adiciona a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

2.2.2 Agregados Leves

Segundo Mehta e Monteiro (2006), os agregados que apresentam massa específica inferior a 1120 kg/m³ são considerados agregados leves e aplicam-se na produção de diversos tipos de concretos leves. A microestrutura dos agregados leves é constituída por um sistema celular de poros isolados entre si por paredes impermeáveis, apresentando assim uma baixa massa unitária.

O concreto é um material heterogêneo, assim, as suas propriedades dependem diretamente das propriedades individuais de seus componentes e da conformidade entre eles. Dessa maneira, a substituição de agregados tradicionais por agregados leves influencia as seguintes propriedades: massa específica, trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade, propriedades

térmicas, retração, fluência e a espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de concreto (ROSSIGNOLO, 2003).

De acordo com Neville e Brooks (2013), a primeira diferenciação que pode ser considerada nos concretos leves é o tipo de agregado leve, sendo classificados quanto à origem em agregados leves naturais e artificiais. Os agregados naturais por não serem encontrados em todas as regiões, são pouco utilizados, sendo os principais: diatomita, pedra-pomes, escória, cinzas vulcânicas e tufos. Os agregados artificiais resultam de processos industriais, classificados de acordo com a matéria-prima utilizada e o processo de fabricação, como a argila expandida e a escória sinterizada.

As partículas dos agregados artificiais são muito menos variáveis que os naturais, isso se dá pela produção sob condições rigorosas controladas. Entretanto, a fim de melhorar a trabalhabilidade da mistura, a areia natural é utilizada como agregado miúdo (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A porosidade e a absorção de água dos agregados leves influenciam significativamente as propriedades do concreto e a hidratação do cimento. Os fatores que determinam a velocidade e a quantidade de água absorvida pelos agregados leves são os seguintes: porosidade total, conectividade entre poros, características da superfície do agregado e umidade do agregado antes da mistura (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005).

A argila expandida apresenta um significativo potencial de aplicação na produção de concretos estruturais. No Brasil, a produção é limitada a um único fabricante, sendo principalmente voltada para abastecer a indústria têxtil, a jardinagem e o paisagismo. Devido aos avanços na tecnologia de concretos e das pesquisas e estudos de universidades, a utilização desse material no setor da construção civil tem aumentado significativamente nos últimos anos (MAYCÁ; RECENA; CREMONINI, 2009).

Algumas pesquisas mostram que a utilização da argila expandida na produção de concreto leve possibilita de maneira satisfatória a aplicação estrutural dos concretos em estudo (ROSSIGNOLO, 2003; PEREIRA, 2008; BORJA, 2011; FERREIRA, 2015).

Neste trabalho, na produção do concreto foram utilizados agregados graúdos de argila expandida e agregados miúdos de areia natural (substituição parcial de

areia de PET). A seguir, serão apresentados o processo de fabricação de agregados leves e os tipos de argila expandida produzidos no Brasil.

2.2.2.1 Processo de Fabricação de Agregados Leves

A sinterização e o forno rotativo são os processos mais empregados na fabricação dos agregados leves artificiais. No processo de produção em forno rotativo, o agregado é obtido pelo aquecimento de matéria-prima em um forno rotativo até a temperatura de fusão incipiente (1000° a 1200°C). Assim, ocorre a expansão do material resultado da geração de gases que ficam aprisionados em uma massa pirolástica viscosa. A estrutura porosa é mantida no resfriamento, o material pode ser reduzido à dimensão desejada antes do aquecimento ou pode ser realizada a britagem após a expansão. Enquanto, no processo de sinterização o material umedecido é conduzido por uma esteira sobre queimadores, assim, o calor penetra gradualmente na espessura total da camada do material. Na sinterização, a viscosidade é tal que os gases expandidos são aprisionados (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Em geral, o agregado produzido por sinterização apresenta os poros abertos, sem recobrimento e com altos valores de absorção de água. Os agregados produzidos em forno rotativo normalmente possuem granulometria variada, formato arredondado regular e recebem a denominação de “encapado” por possuir uma camada externa de material vítreo que diminui significativamente a absorção de água (ROSSIGNOLO, 2009).

2.2.2.2 Agregado Leve Argila Expandida

A argila é um material fino, composto por grãos lamelares de dimensões inferiores a dois micrometros, formada em proporções variáveis de silicato de alumínio e óxidos de silício, ferro, magnésio e outros elementos. A argila expandida é resultado da propriedade de piro-expansão, caracterizada pela formação de gases quando aquecida a altas temperaturas – acima de 1000° (BAUER, 2008).

No Brasil, a argila expandida é o único agregado leve produzido. A empresa Cinexpan Indústria e Comércio Ltda. produz esse agregado. A produção ocorre em forno rotativo, com temperaturas médias de 1100°C e argila com características piro-

expansivas extraída no município Jundiá. Devido ao processo de fabricação, o agregado apresenta formato arredondado regular e núcleo esponjoso, envolvido por uma camada vitrificada, com baixa permeabilidade (ROSSIGNOLO, 2009).

O agregado é fabricado em diferentes faixas granulométricas, a fim de atender aos diferentes setores, como a construção civil, a jardinagem e a indústria têxtil. Na construção civil pode ser utilizado para enchimentos leves e também na produção de concretos leves estruturais.

As argilas produzidas são as denominadas comercialmente de Cinexpan 0500 ($D_{máx} = 4,8$ mm), Cinexpan 1506 ($D_{máx} = 12,5$ mm), Cinexpan 2215 ($D_{máx} = 19,0$ mm), Cinexpan 3222 ($D_{máx} = 32$ mm) e Cinexpan Laminado 2,5 mm ($D_{máx} = 2,5$ mm). No entanto, usualmente são utilizadas em concretos estruturais as argilas Cinexpan 0500, 1506 e 2215, conforme Figura 3. A Tabela 4 apresenta as características de alguns agregados leves comerciais.

Figura 3 – Aspecto das argilas expandidas brasileiras Cinexpan 0500, Cinexpan 1506 e Cinexpan 2215



Fonte: Cinexpan (2017a)

Tabela 4 – Características de alguns agregados leves comerciais

Nome comercial	Massa específica (kg/dm ³)	Massa unitária (kg/dm ³)	Dimensão (mm)	Absorção de água 24h (%)
Cinexpan 0500	1,5	0,9	0 - 4,8	6
Cinexpan 1506	1,1	0,6	6,3 - 12,5	7
Cinexpan 2215	0,6	0,5	12,5 - 19	10

Fonte: Adaptado de Rossignolo (2009)

2.3 Propriedades do concreto leve endurecido

As propriedades do concreto leve endurecido analisadas neste estudo serão apresentadas nos próximos itens.

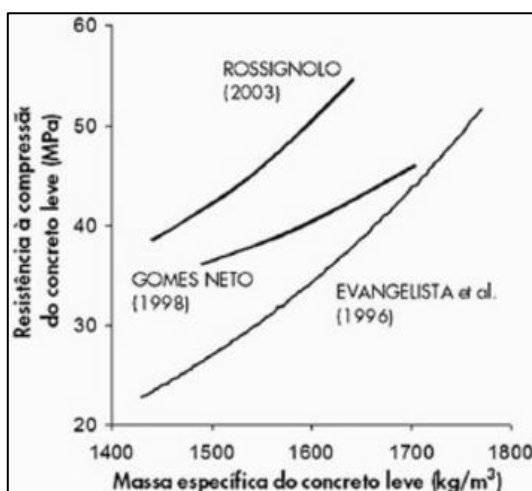
2.3.1 Massa Específica

Como a trabalhabilidade, a massa específica e a resistência são duas propriedades geralmente exigidas para concretos leves estruturais. Deseja-se obter a máxima proporção possível de resistência – massa específica com o menor custo do concreto. Especificações limitam a massa específica seca ao ar do concreto ao valor máximo de 1840 kg/m^3 , porém não existe limite mínimo. Entretanto, quando usado um agregado altamente poroso maior que a dimensão máxima de 19 mm, a massa específica pode ser reduzida para menos de 1440 kg/m^3 , mas a resistência mínima de 17 Mpa aos 28 dias pode não ser atingida (MEHTA; MONTEIRO, tradução nossa, 2006).

2.3.2 Resistência à Compressão Axial

As propriedades mais utilizadas na caracterização dos concretos leves estruturais são a resistência à compressão e a massa específica, influenciadas pelo tipo e granulometria do agregado leve utilizado. A granulometria possui maior influência na massa específica e resistência mecânica dos concretos leves que nos concretos convencionais, visto que o valor da massa específica da maioria dos tipos de concretos leves, como a argila expandida nacional, é inversamente proporcional à sua dimensão (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005). A Figura 4 apresenta a relação entre a resistência à compressão e a massa específica do concreto leve com argila expandida obtida em alguns estudos.

Figura 4 – Relação entre resistência à compressão e massa específica do concreto leve com argila expandida



Fonte: Rossignolo (2009, p. 58)

A resistência mecânica potencial da matriz de cimento é utilizada mais eficientemente nos concretos leves, comparado aos concretos convencionais, em função da similaridade dos valores de módulo de deformação do agregado e da matriz de concreto e da melhoria da qualidade da zona de transição pasta-agregado. Dessa maneira, os concretos leves apresentam ruptura devido ao colapso da argamassa, que tende a ocorrer na região ao redor do agregado. Nos concretos com agregados leves, a linha de fratura atravessa os agregados, como ocorre em concretos de alta resistência com massa específica normal. Enquanto, em concretos convencionais a ruptura ocorre pelo colapso da argamassa e a separação das fases (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005).

Um estudo da resistência à compressão de concretos leves produzidos com argila expandida (MAYCÁ; RECENA; CREMONINI, 2009), utilizou a substituição total do agregado graúdo por argila expandida. Executaram-se nove traços com variação do teor de argila (20%, 30% e 40%) e da matriz cimento-areia (1:3; 1:4 e 1:5, em massa). As argilas expandidas utilizadas foram 2215 e a 1506. Os resultados de resistência à compressão variaram de 10 a 33 MPa, sendo que os traços 1:3 e 1:4 apresentaram resistência superior aos 17 MPa nos três teores de argila estudados, entretanto, o traço 1:5 que possui menor consumo cimento, apresentou resistência à compressão nos três teores em estudo abaixo de 17 MPa. Assim, o concreto produzido com os traços 1:3 e 1:5 mostrou viabilidade para aplicação estrutural.

Outro estudo utilizando a argila expandida nacional na produção de concretos leves (PEREIRA, 2008), nesta pesquisa as graduações usadas foram a 0500 e a 1506. A dosagem efetuada na produção dos concretos leves não utilizou aditivos e adições minerais, os traços unitários em massa: (T1) 1:2,01:1,10:0,78 ; (T2) 1:2,00:1,32:0,62 ; (T3) 1:1,93:1,54:0,47 (cimento : areia : argila expandida 0500 : argila expandida 1506), fixando relação água/cimento em 0,43. A resistência à compressão aos 28 dias para os 3 traços apresentou valores aceitáveis, variando de 20 a 22 MPa. O teor de cimento foi considerado elevado (425 kg/m³), porém a produção de concreto leve normalmente apresenta valores altos de consumo de cimento.

2.3.3 Resistência à Tração

A resistência à tração dos concretos leves são inferiores ao observado em concretos com massa específica normal, na compressão diametral e na flexão, para a mesma resistência à compressão. Isso se explica pelo elevado volume de vazios dos agregados leves, que nas argilas expandidas pode atingir até 50% do volume total (ROSSIGNOLO, 2009).

A resistência à tração em um concreto é influenciada pelos agregados, pela quantidade de água e pela aderência entre os agregados e a pasta de cimento. Nos concretos leves, a aderência “agregados – matriz cimentícia” é de boa qualidade, porém a resistência à tração é influenciada negativamente pelos agregados leves e pela quantidade de água utilizada (FARIAS, 2009);

Outro fator que penaliza a resistência à tração dos concretos leves é a linha de fratura. Em concretos normais a linha de fratura contorna os agregados, nos concretos de baixa densidade a linha de fratura atravessa os agregados. Deve-se ao fato que os agregados leves apresentam uma elevada porcentagem de volume de vazios, resultando em uma menor resistência à tração face à da pasta (FARIAS, 2009).

A Tabela 5 apresenta algumas relações para estimar a resistência à tração por compressão diametral e na flexão, através da resistência à compressão.

Tabela 5 – Relação entre resistência à compressão axial e resistência à tração (por compressão diametral e flexão) de concretos leves

Referência	Resistência à tração (MPa)		Observações
	Compressão diametral	Flexão	
ACI 318 (1995)	$0,42.f_c^{0,5}$	$0,46.f_c^{0,5}$	Agregado leve
ACI 318 (1995)	$0,48.f_c^{0,5}$	$0,53.f_c^{0,5}$	Areia e Agregado leve
CEB/FIP (1977)	$0,23.f_{cu}^{0,67}$	$0,46.f_{cu}^{0,67}$	-

f_c = Resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos (MPa);

f_{cu} = Resistência à compressão em corpos de prova cúbicos (MPa).

Fonte: Rossignolo e Agnesini (2005, p. 1347)

2.3.4 Propriedades Térmicas

As propriedades térmicas dos concretos leves são consideravelmente diferentes dos concretos convencionais. Devido ao ar aprisionado na estrutura dos agregados leves, ocorre a redução de absorção e da transferência de calor quando comparado aos agregados convencionais. Assim, estudos visando a utilização de concretos leves em painéis monolíticos moldados in loco tornam-se interessantes, uma vez que reduz a absorção e a transferência para o ambiente interno do calor resultante da radiação solar (SACHT, 2008; SACHT; ROSSIGNOLO; SANTOS, 2010; ANGELIN, 2014).

A Tabela 6 apresenta uma comparação de algumas propriedades térmicas para concretos leves e concretos convencionais.

Tabela 6 – Propriedades térmicas de concretos leves e concretos convencionais

Propriedades	Concreto Leve	Concreto Convencional
Massa específica (kg/m ³)	1850	2400
Resistência à compressão (MPa)	20 - 50	20 - 70
Calor específico (cal/g.°C)	0,23	0,22
Condutividade térmica (W/m. °K)	0,58 - 0,86	1,40 - 2,90
Difusão térmica (m ² /h)	0,0015	0,0025 - 0,0079
Expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	9	11

Fonte: Holm e Bremner (2000) apud Angelin (2014, p.30)

2.3.4.1 Condutividade Térmica

A NBR 15220 PARTE 1 (ABNT, 2005) define condutividade térmica como a propriedade física de um material homogêneo ou isotrópico, no qual apresenta um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m^2 , quando exposta a um gradiente de temperatura de 1 Kelvin por metro.

A condutividade térmica é definida como a capacidade que um material tem em transferir calor, relacionado ao fluxo de calor por condução. Considera-se um fator muito importante no cenário da construção civil, uma vez que é possível estimar o fluxo de calor em uma parede a partir da obtenção do valor deste parâmetro (ANGELIN, 2014).

Visto que a condutividade térmica é uma das propriedades físicas mais importantes ao que se refere ao cálculo térmico de um material, a NBR 15220 PARTE 2 (ABNT, 2005) especifica valores deste parâmetro para concretos produzidos com argila expandida em função da massa específica, conforme Tabela 7.

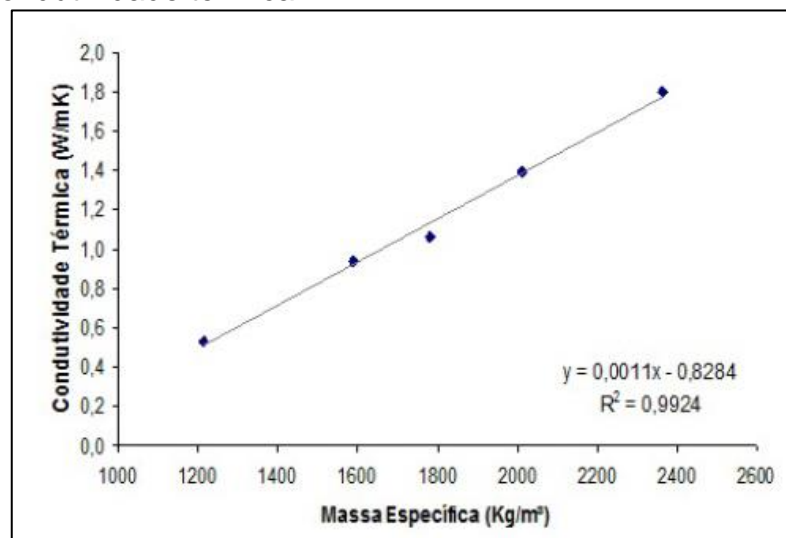
Tabela 7 – Valores de condutividade térmica de concreto com argila expandida

Concreto com argila expandida	P (kg/m ³)	λ (W/(m.K))
dosagem de cimento > 300 kg/m ³	1600-1800	1,05
ρ dos inertes > 350 kg/m ³	1400-1600	0,85
	1200-1400	0,70
	1000-1200	0,46

Fonte: Adaptado de NBR 15220 (ABNT, 2005)

Um estudo da influência da argila expandida brasileira na condutividade térmica é apresentado na Figura 5, realizado por Sacht, Rossignolo e Santos (2010). Neste estudo, utilizou-se o método do fio quente paralelo, com massa específica entre 1220 kg/m^3 e 2400 kg/m^3 . Resultou em valores de condutividade térmica entre $0,54 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$ e $1,8 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$.

Figura 5 – Influência da massa específica do concreto com argila expandida brasileira na condutividade térmica



Fonte: Sacht, Rossignolo e Santos (2010, p.37)

Segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005), a condutividade térmica pode ser obtida por dois métodos: Medição pelo princípio da placa quente e Medição pelo método fluximétrico. Este trabalho utiliza o método fluximétrico para obtenção da condutividade térmica dos concretos, conforme NBR 15220 PARTE 5 (ABNT, 2005). O método de utilização de técnicas fluximétricas mede a resistência térmica em regime estacionário através de corpos de prova na forma de placas plana, obtendo-se assim a condutividade térmica.

2.4 Agregado reciclado de PET

2.4.1 Politereftalato de Etileno

O PET (politereftalato de Etileno) é classificado quimicamente como um polímero termoplástico. É produzido através de uma reação entre o ácido tereftálico purificado (PTA) com o monoetileno glicol (MEG) (ABIPET, 2012b).

O PET possui uma excelente combinação de propriedades: rigidez, tenacidade, alta resistência ao calor, isolamento elétrica, estabilidade química e dimensional, possibilitando assim ampla aplicação. É altamente utilizado como fibras, filmes para embalagens, em garrafas para bebidas e reforços (fibras) em materiais de construção civil, devido a sua temperatura de fusão alta (aproximadamente 250°C) e ao valor de transição vítrea (aproximadamente 70°C), este material mantém suas

propriedades mecânicas boas em temperaturas superiores a 175°C (ISOLDI, 2003). A Tabela 8 apresenta algumas propriedades do polímero PET.

Tabela 8 – Propriedades do polímero Politereftalato de Etileno

Características do polímero	Valores
Massa molecular	15000 - 42000
Densidade	1,33 - 1,45
Índice de refração	1,65 - 1,66
Temperatura de fusão	250 - 270 °C
Temperatura de transição vítrea	70 - 74 °C

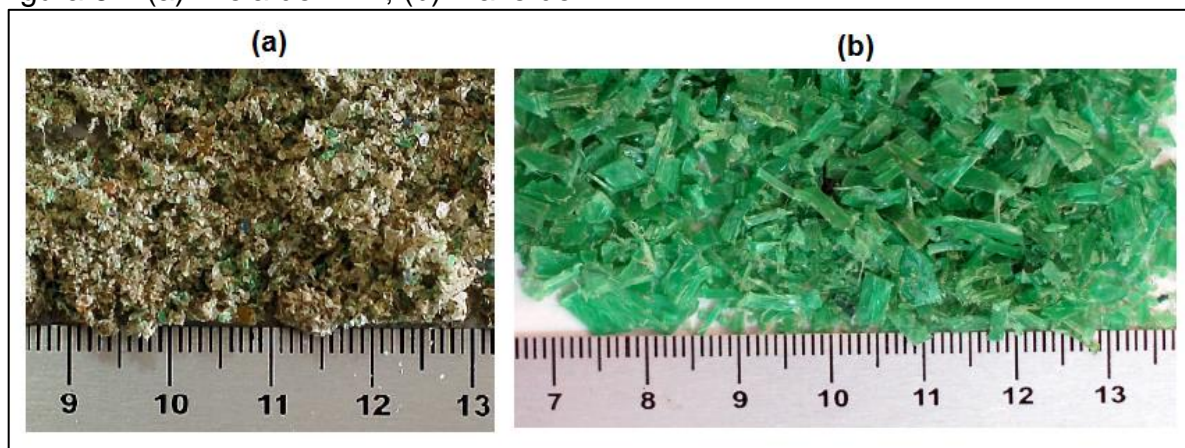
Fonte: Adaptado de Montenegro et al. (1996)

2.4.2 Materiais produzidos com resíduos de PET

A construção civil tem estudado os mais diversos tipos de resíduos de PET visando encontrar possibilidades de incorporá-los como materiais de construção. Alguns estudos mostram a viabilidade da utilização do PET como agregado em diversas aplicações.

Os agregados reciclados de PET utilizados em pesquisas são a areia de PET e o flake de PET, conforme mostra a Figura 6. A areia de PET é um material com pequenas dimensões (material passante na peneira com malha de 4,8 mm) e o flake de PET apresenta dimensões com comprimentos mais variados.

Figura 6 – (a) Areia de PET; (b) Flake de PET



Fonte: Adaptado de Modro (2008)

Modro (2008) estudou a produção de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET, através da substituição parcial dos agregados minerais no concreto. Utilizou-se três tipos de resíduos e quatro substituições para cada resíduo

(1%, 2%, 3% e 4%vol.) para o resíduo Filme, e 10%, 20%, 30% e 40%vol. para resíduos denominado Areia e Flake. Os resultados obtidos apontaram a viabilidade de utilização de resíduos de PET pós-consumo substitutos de agregados minerais em concreto de cimento Portland em aplicações específicas.

Canellas (2015) estudou a substituição parcial da areia natural por material granulado proveniente de garrafas de PET. A pesquisa teve como objetivo analisar a viabilidade de produção de argamassas para uso na construção civil incorporando o resíduo de PET. Estudaram-se substituições nas proporções de 10%, 30% e 50%, o percentual de 30% foi observado como a melhor possibilidade de utilização, uma vez que não apresentou perdas significativas na plasticidade e na resistência à compressão e à tração. É interessante destacar a possível economia significativa na produção de volumes de areia natural, cuja extração causa grandes danos ao ecossistema dos rios e suas margens.

Correa (2015) estudou a substituição parcial da areia natural por PET e PP (polipropileno) na forma de flocos e em diversas formulações, a fim de produzir concreto estrutural com agregados leves para aplicação na construção civil, o estudo foi dividido em duas etapas. A primeira etapa da pesquisa foi avaliar o teor adequado (em volume) em diferentes tempos de cura para cada polímero a fim de encontrar um bom desempenho mecânico em resistência à compressão, o teor ótimo encontrado foi de 10% para ambos os materiais. Na segunda etapa, o teor encontrado foi utilizado para avaliar a influência no desempenho mecânico e na durabilidade dos concretos para 28 a 90 dias de cura. Analisando os resultados, observou-se um pequeno decréscimo na resistência à compressão axial nas amostras com polímeros quando comparadas ao concreto referência. As amostras com flocos de PET apresentaram menor teor de vazios e conseqüentemente menor absorção quando comparadas às amostras de PP, sugerindo uma possível melhor interação do PET com a matriz cimentícia.

Jardim (2017) estudou a influência da substituição parcial de areia natural por agregado miúdo reciclado de PET em concretos convencionais, os teores estudados foram 10% e 15% (em volume). Os concretos produzidos com substituições foram comparados a um concreto referência (100% de areia natural). Avaliaram-se as propriedades mecânicas resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão, após análise estatística constatou-se não haver diferença significativa entre

os resultados dos concretos produzidos com substituição de PET nos teores estudados (10% e 15%) em relação ao concreto referência.

Vaz (2017) estudou o desempenho da argamassa com substituição de areia natural por areia de PET. Foram produzidos traços com teores de 5%, 15% e 30% (em volume) de agregado miúdo de PET em substituição pelo agregado natural. Realizaram-se para o estado fresco os ensaios de índice de consistência, densidade e teor de ar incorporado. Analisaram-se no estado endurecido a absorção por capilaridade, resistência à compressão axial e de tração na flexão. A partir dos resultados, observou-se que as substituições de 5% e 15% apresentaram desempenho satisfatório tanto no estado fresco quanto no endurecido, encontrando-se dentro dos parâmetros normativos. Entretanto, para a substituição de 30% observou-se perda de desempenho principalmente com relação a absorção de água por capilaridade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com os objetivos, citados nos capítulos anteriores, este capítulo apresenta os métodos e procedimentos realizados para a execução do estudo.

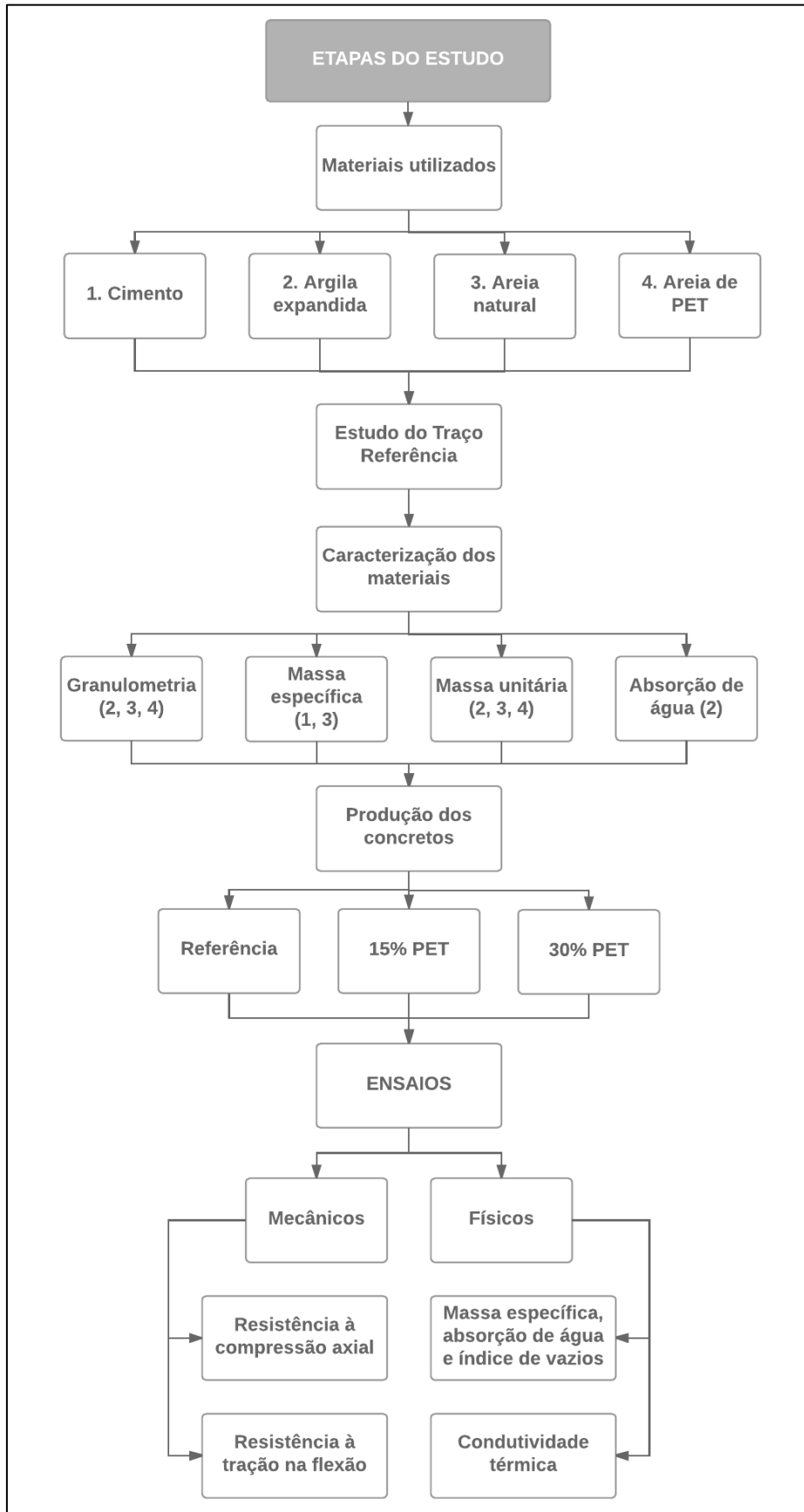
3.1 Programa experimental

O programa experimental pode ser dividido basicamente em três etapas: a) caracterização dos materiais, b) produção dos concretos e c) realização dos ensaios. Através de um traço conhecido do fabricante Cinexpan do agregado leve, que será detalhado a seguir, foram desenvolvidos três tipos de concretos leves: concreto leve contendo 100% de areia natural, concreto leve com substituição parcial de 15% do agregado miúdo natural por agregado reciclado de PET e concreto leve com substituição parcial de 30% do agregado miúdo natural por agregado reciclado de PET. Para a determinação dos teores da pesquisa, partiu-se do estudo de Jardim (2017) que apontou que para teores de substituição de até 15% em concretos convencionais não apresentou perdas nas propriedades mecânicas. Desse modo, foram analisadas as seguintes propriedades dos concretos leves no estado endurecido: resistência à compressão, resistência à tração na flexão e condutividade térmica.

Para avaliação da resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739, 2007), serão moldados para cada traço 6 corpos de prova cilíndricos, ensaiados nas idades de controle de 7 e 28 dias. Para avaliação da resistência à tração na flexão (ABNT NBR 12142, 2010), serão moldados 6 corpos de prova prismáticos ensaiados nas idades de controle de 7 e 28 dias. Por fim, para análise da condutividade térmica (ABNT NBR 15220, 2005), serão moldados para cada traço 2 placas de concreto ensaiadas a partir da idade de controle de 28 dias.

A Figura 7 apresenta o detalhamento do programa experimental utilizado no estudo dos concretos leves.

Figura 7 – Detalhamento do programa experimental



Fonte: Elaboração própria

3.2 Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa são caracterizados de acordo com as prescrições da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Na produção dos concretos leves foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland, argila expandida (CINEXPAN 2215), areia natural e areia de PET.

3.2.1 Cimento Portland

O cimento utilizado é o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI). Optou-se pela utilização do cimento de alta resistência inicial para possível aplicação estrutural. A massa específica encontrada para o cimento foi $3,10 \text{ g/cm}^3$, de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001). Na Tabela 9 são apresentadas as informações físico/químicas do cimento fornecidas pelo fabricante, sendo referentes à Junho/2017.

Tabela 9 – Propriedades físico/químicas do cimento CPV ARI

QUÍMICOS										
Al ₂ O ₃	SiO ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P. Fogo	CaO L.	R Ins.	Eq. Alc.	
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
4,22	18,62	2,92	60,46	3,72	3,27	3,37	0,58	0,63	0,68	
FÍSICOS										
Exp. Quente	Tempo de pega		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à compressão			
	Início	Fim					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Mm	h : min	h : min	%	cm ² /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
0,35	03:23	04:08	29,5	4.470	0,03	0,31	22,4	37,9	44,9	53,6

Fonte: Adaptado de Itambé (2017)

3.2.2 Argila expandida

A argila expandida nacional utilizada como agregado leve é fabricada pela CINEXPAN S. A., na graduação: CINEXPAN 2215 ($D_{\text{máx}} = 19 \text{ mm}$). A Figura 8 ilustra a argila expandida nacional CINEXPAN 2215 utilizada na produção dos concretos leves como agregado graúdo. A Tabela 10 apresenta a análise química do agregado leve, segundo dados do fabricante.

Figura 8 – Aspecto da argila expandida CINEXPAN 2215



Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 – Análise química do agregado leve, segundo informações do fabricante

Análise química	(%)
Perda ao fogo	6,80
Silício (em SiO ₂)	52,90
Alumínio (Al ₂ O ₃)	18,90
Ferro (em Fe ₂ O ₃)	11,10
Titânio (em TiO ₂)	0,88
Cálcio (em CaO)	0,09
Magnésio (em MgO)	3,44
Sódio (em Na ₂ O)	0,22
Potássio (em K ₂ O)	5,50

Fonte: Cinexpan (2017b)

Parte da caracterização do agregado leve foi realizada no laboratório de Engenharia civil, do campus Alegrete/RS e parte fornecida pelo fabricante. A massa específica da argila expandida 2215, fornecida pelo fabricante foi de 0,64 kg/dm³. A Tabela 11 apresenta os valores de massa unitária (NBR NM 45/2006) e absorção de água (NBR NM 53/2009) da argila expandida 2215.

Tabela 11 – Massa unitária e absorção de água da argila expandida 2215

Massa unitária no estado seco e solto - pap (kg/m³)	504
Absorção de água 24h (%)	8,34

Fonte: Elaboração própria

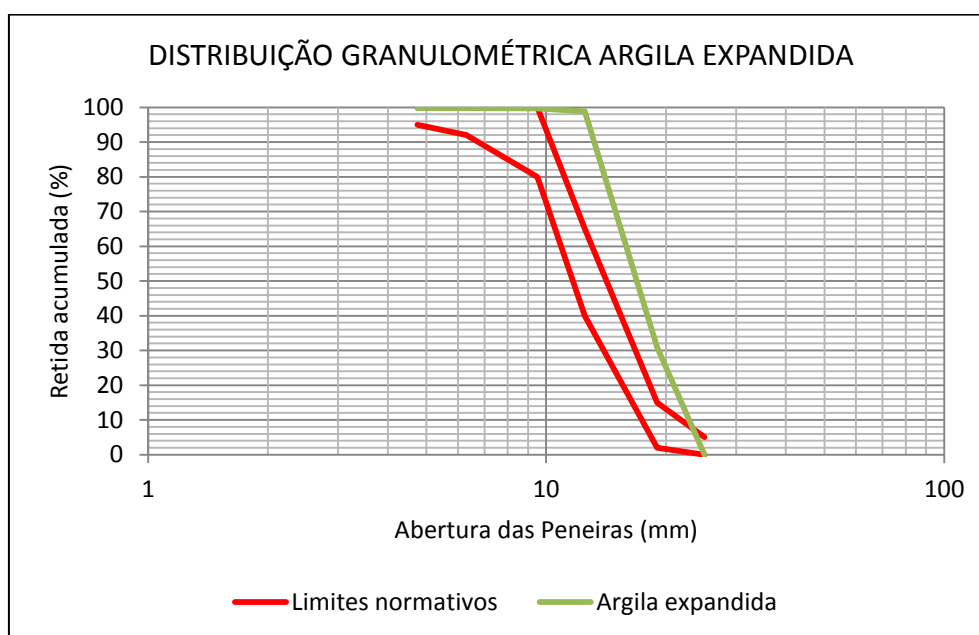
A Tabela 12 apresenta a composição granulométrica do agregado leve, obtida de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). A Figura 9 mostra a curva granulométrica e a Figura 10 ilustra a amostra antes da execução do ensaio.

Tabela 12 – Composição granulométrica da argila expandida 2215

GRANULOMETRIA ARGILA EXPANDIDA							
PENEIRA (mm)	Amostra 1 (g)	Retida (%)	Retida Acumulada (%)	Amostra 2 (g)	Retida (%)	Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada média (%)
25,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00
19,00	1498,7	29,97	29,97	1597,1	31,94	31,94	30,96
12,50	3443,8	68,88	98,85	3348,9	66,98	98,92	98,89
9,50	45,4	0,91	99,76	33,7	0,67	99,59	99,68
6,30	4,1	0,08	99,84	3,7	0,07	99,67	99,75
4,75	0,0	0,00	99,84	0,0	0,00	99,67	99,75
2,36	0,0	0,00	99,84	0,0	0,00	99,67	99,75
1,18	0,0	0,00	99,84	0,0	0,00	99,67	99,75
0,60	0,0	0,00	99,84	0,0	0,00	99,67	99,75
0,30	1,2	0,02	99,86	3,2	0,06	99,73	99,80
0,15	0,5	0,01	99,87	1,6	0,03	99,76	99,82
Fundo	3,1	0,06	99,94	5,5	0,11	99,87	99,91
Total	4996,8			4993,7			
Módulo de finura							7,29
D _{máx} característica							25

Fonte: Elaboração própria

Figura 9 – Curva granulométrica da argila expandida



Fonte: Elaboração própria

A Figura 9 mostra que a curva granulométrica da argila expandida 2215 excedeu os limites normativos da NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 10 – Ensaio de granulometria da argila expandida CINEXPAN 2215



Fonte: Elaboração própria

3.2.3 Areia Natural

Como agregado miúdo foi utilizado a areia natural proveniente do município de Manoel Viana, do estado do Rio Grande do Sul. A composição granulométrica obtida conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), a determinação da massa específica realizada de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2006) e a massa unitária conforme NBR NM 45 (ABNT, 2006). A Tabela 13 apresenta os valores de massa específica e massa unitária da areia natural.

Tabela 13 – Massa específica e massa unitária da areia natural

Massa unitária (kg/m³)	1604
Massa específica (kg/m³)	2653

Fonte: Elaboração própria

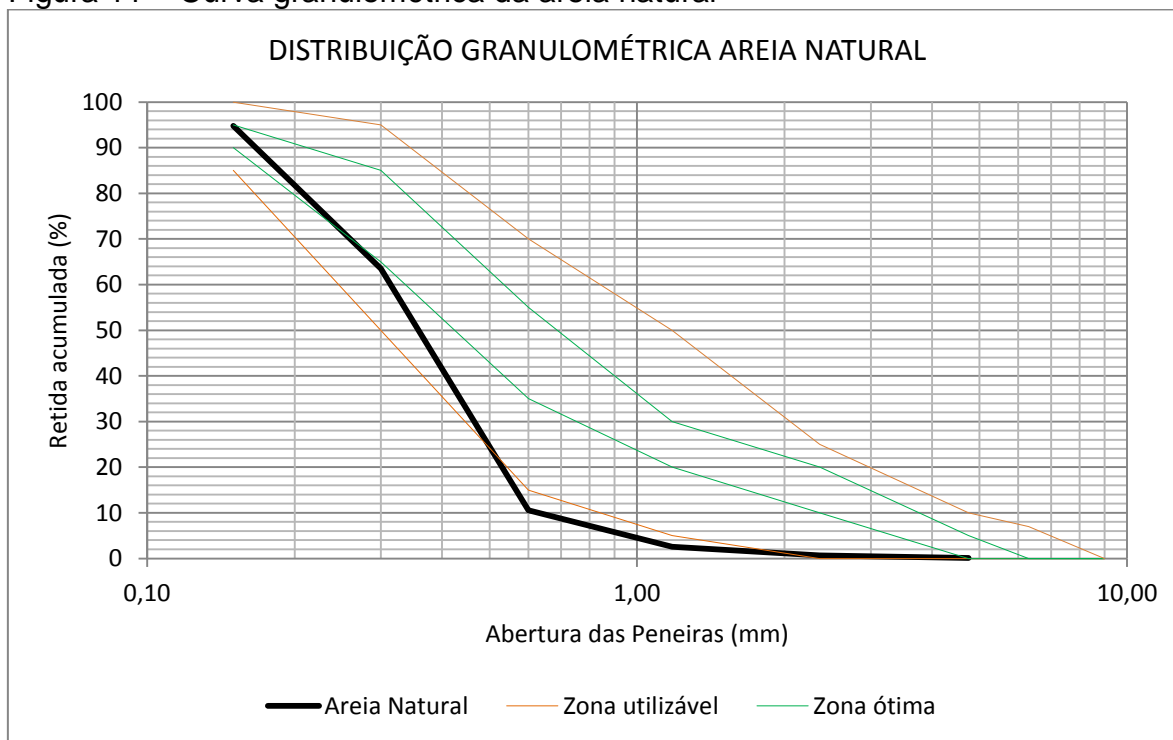
A Tabela 14 apresenta a composição granulométrica da areia natural e a Figura 11 sua curva granulométrica.

Tabela 14 – Composição granulométrica da areia natural

GRANULOMETRIA AREIA NATURAL							
PENEIRA (mm)	Amostra 1 (g)	Retida (%)	Retida Acumulada (%)	Amostra 2 (g)	Retida (%)	Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada média (%)
4,75	0	0	0	0,9	0,18	0,18	0,09
2,36	3,2	0,64	0,64	2,5	0,5	0,68	0,66
1,18	10,7	2,14	2,78	8,4	1,68	2,36	2,57
0,60	42,7	8,54	11,32	37	7,4	9,76	10,54
0,30	270,1	54,02	65,34	259,4	51,88	61,64	63,49
0,15	148,9	29,78	95,12	164	32,8	94,44	94,78
Fundo	20,7	4,14	99,26	25,7	5,14	99,58	99,42
Total	496,3	99,26		497,9	99,58		
Módulo de finura							1,72
Dmáx característica							1,18

Fonte: Elaboração própria

Figura 11 – Curva granulométrica da areia natural



Fonte: Elaboração própria

Após a determinação do módulo de finura, de acordo com a classificação de Bauer (2008) a areia natural é considerada areia fina.

3.2.4 Agregado reciclado de PET

O agregado reciclado de PET utilizado no experimento é proveniente da empresa de reciclagem PETCEU/ Paraná-PR. Estudos de Jardim (2017) e Vaz (2017) utilizaram o mesmo agregado reciclado de PET, obtendo a composição granulométrica situada na zona ótima. A areia de PET utilizada nesta pesquisa é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Areia de PET



Fonte: Elaboração própria

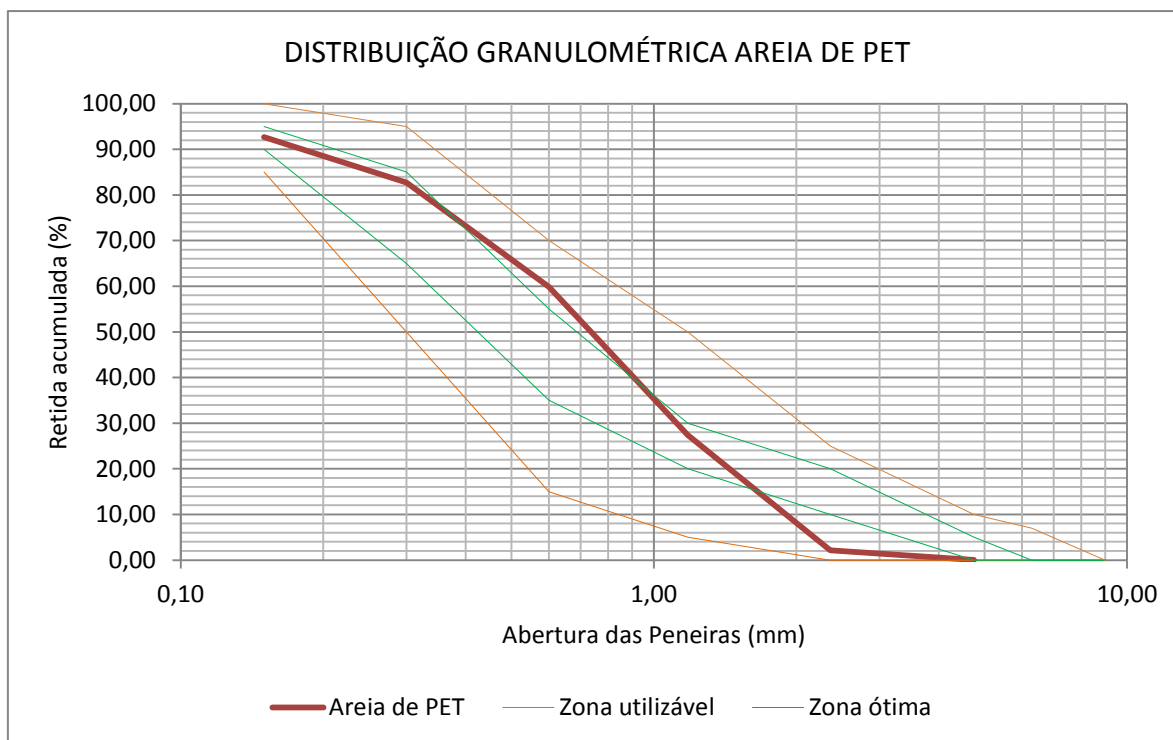
A composição granulométrica seguiu prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003) e a massa unitária a NBR NM 45 (ABNT, 2006). O valor encontrado de massa unitária para a areia de PET foi 357 kg/m³. A Tabela 15 apresenta a composição granulométrica da areia de PET e a Figura 13 sua curva granulométrica.

Tabela 15 – Composição granulométrica da areia de PET

GRANULOMETRIA AREIA DE PET							
PENEIRA (mm)	Amostra 1 (g)	Retida (%)	Retida Acumulada (%)	Amostra 2 (g)	Retida (%)	Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada média (%)
4,75	0	0,00	0,00	0,3	0,10	0,10	0,05
2,36	7,3	2,43	2,43	5,3	1,77	1,87	2,15
1,18	81,2	27,07	29,50	70,2	23,40	25,27	27,38
0,6	85,3	28,43	57,93	109,5	36,50	61,77	59,85
0,3	73,5	24,50	82,43	63,7	21,23	83,00	82,72
0,15	30,9	10,30	92,73	28,8	9,60	92,60	92,67
Fundo	21,3	7,10	99,83	21,4	7,13	99,73	99,78
Total	299,5			299,2			
Módulo de finura							2,65
D _{máx} característica							2,36

Fonte: Elaboração própria

Figura 13 – Curva granulométrica da Areia de PET



Fonte: Elaboração própria

Após a determinação do módulo de finura, de acordo com a classificação de Bauer (2008) a areia de PET é considerada areia média.

3.3 Produção dos Concretos

A produção dos concretos leves teve como referência um traço conhecido, disponibilizado pelo fabricante da argila expandida, conforme a Tabela 16. O traço em estudo é sugerido por Cinexpan (2017c), especificado para aplicação em paredes de concreto leve, limitando a Resistência à compressão em 15 MPa.

Tabela 16 – Traço em massa do fabricante

Traço em massa		
m= 3,05	1: 2,38 : 0,67	
Cimento	340	kg
Areia	810	kg
Argila expandida	230	kg
Água	215	kg
a/c	0,63	
Aditivo	0,8% (2,72 kg)	

Fonte: Elaboração própria

Na primeira etapa deste estudo foi realizada a adaptação do traço para a produção dos concretos com resistência superior a 17 MPa, caracterizando um concreto leve estrutural. A Tabela 17 apresenta o traço utilizado na pesquisa para o concreto de referência.

Tabela 17 – Traço utilizado

Traço utilizado		
m= 3,05	1: 2,38 : 0,67	
Cimento	340	kg
Areia	810	kg
Argila expandida*	230	kg
Água	147	kg
a/c	0,43	

* (Saturada superfície seca - Absorção 8,34%)

Fonte: Elaboração própria

A produção do concreto referência foi desenvolvida a partir do traço adaptado, seguido da produção de outros dois concretos: concreto com substituição parcial em volume de 15% de areia de PET e 30% de areia de PET, respectivamente.

Os concretos foram executados no laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Alegrete/RS. Posteriormente, os resultados obtidos nos ensaios de controle dos concretos com as substituições foram comparados ao concreto de referência.

3.3.1 Mistura dos materiais

Os agregados leves têm capacidade de absorver grandes quantidades de água, assim, anterior à produção dos concretos foi executada a imersão em água da argila expandida por 24 horas, para que o agregado atingisse a condição saturado superfície seca. A Figura 14 apresenta a argila expandida após imersão.

Figura 14 – Argila expandida após imersão em água por 24 horas



Fonte: Elaboração própria

O processo de mistura para o concreto referência e os concretos com substituição parcial de areia de PET é análogo, ilustrado na Figura 15, ocorreu em betoneira de eixo inclinado previamente umedecida da seguinte maneira:

1. Primeiramente, a introdução da argila expandida;
2. 50 % da quantidade da água (proveniente da rede pública);
3. Cimento Portland de alta resistência;
4. Areia;
5. Por fim, restante da quantidade de água.

Figura 15 – Mistura dos materiais



Fonte: Elaboração própria

Após o amassamento do concreto, a trabalhabilidade dos concretos foi verificada através do ensaio de abatimento pelo tronco de cone, seguindo as prescrições da NBR NM 67 (ABNT, 1998). A Figura 16 ilustra o ensaio de Slump Test das três misturas.

Figura 16 – Ensaio de abatimento



Fonte: Elaboração própria

Considerando que os traços foram confeccionados com a mesma relação água/cimento ($a/c=0,43$), observa-se na Figura 19 uma tendência de perda de abatimento com o aumento do teor de PET nas misturas.

O adensamento dos concretos foi executado manualmente, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016). Os corpos de prova cilíndricos, mostrados na Figura 17, foram desmoldados após 24 horas e os prismáticos após 48 horas, e submetidos à cura úmida, com temperatura de $(23 \pm 2^\circ\text{C})$ e umidade relativa do ar superior a 95%. Os corpos de prova permaneceram em cura úmida até a realização dos ensaiados, conforme especificado na NBR 5738 (ABNT, 2016).

Figura 17 – Corpos de prova cilíndricos



Fonte: Elaboração Própria.

3.4 Ensaios de Controle do Concreto Endurecido

Os ensaios de controle foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete/RS. A Tabela 18 apresenta os ensaios normativos utilizados na avaliação dos concretos desenvolvidos nesta pesquisa.

Tabela 18 – Ensaios normativos dos concretos no estado endurecido

Ensaio	Norma
Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão	NBR 9778 (ABNT, 2009) - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica
Resistência à compressão axial	NBR 5739 (ABNT, 2007) Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos
Resistência à tração na flexão	NBR 12142 (ABNT, 2010) - Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos
Condutividade térmica	NBR 15220 (ABNT, 2005) - Desempenho térmico

Fonte: Elaboração própria

3.4.1 Massa específica, índice de vazios e absorção de água

No estado endurecido, os valores de massa específica, índice de vazios e absorção de água foram determinados seguindo as prescrições da NBR 9778 (ABNT, 2009), para concretos leves com idades de 28 dias, utilizando dois corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, para cada traço de concreto desenvolvido.

3.4.2 Resistência à Compressão Axial

O ensaio de resistência à compressão axial seguiu as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 2007). Foram ensaiados 3 corpos de prova ($\phi 10 \times 20 \text{cm}$) para cada idade de controle, 7 e 28 dias. A Figura 18 apresenta a realização do ensaio, na prensa da Marca Instrun, modelo 5595.

Figura 18 – Ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Elaboração própria

3.4.3 Resistência à Tração na Flexão

A resistência à tração na flexão seguiu as prescrições da NBR 12142 (ABNT, 2010), sendo utilizados três corpos de prova prismáticos (100 x 100 x 40 mm), conforme a Figura 19, para cada idade de controle (7 e 28 dias).

Figura 19 – Corpos de prova prismáticos



Fonte: Elaboração própria

3.4.4 Condutividade Térmica

O ensaio para determinação da condutividade térmica foi realizado através de equipamento medidor de fluxo de calor, da marca Lasercomp, modelo FOX 304. A Figura 20 apresenta o equipamento utilizado no ensaio.

Figura 20 – Equipamento utilizado para o ensaio de condutividade térmica



Fonte: Elaboração própria

Realizou-se a determinação da condutividade térmica dos concretos a partir da idade de 28 dias através do método da NBR 15220 PARTE 5 (ABNT, 2005). Para cada traço estudado serão ensaiadas duas placas, conforme a Figura 21 com dimensões de 250 mm x 250 mm x 30 mm. Anteriormente ao ensaio, todas as amostras foram secas em estufa a uma temperatura de 60°C até atingirem constância de massa. Após a realização dos ensaios os resultados foram comparados aos valores de referência presentes na NBR 15220 PARTE 2 (ABNT, 2005).

Figura 21 – Placas de concreto para análise da condutividade térmica



Fonte: Elaboração própria

4 ANÁLISE E RESULTADOS

Este capítulo reserva-se à apresentação e discussão dos resultados dos concretos experimentais. Desse modo, divide-se esse capítulo em três etapas principais:

- Caracterização de propriedades físicas;
- Caracterização de propriedades mecânicas;
- Avaliação da condutividade térmica.

4.1 Caracterização de propriedades físicas

Neste tópico, são apresentados valores de massa específica dos concretos no estado fresco determinados no momento da moldagem, e os valores de absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos no estado endurecido conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005).

4.1.1 Massa específica

Primeiramente, determinaram-se as massas específicas dos concretos frescos, apresentadas na Tabela 19. Os valores de massa específica no estado fresco foram cerca de 25% a 30% abaixo dos valores usualmente obtidos em concretos convencionais.

Tabela 19 – Massa específica dos concretos no estado fresco

Concreto	Massa específica estado fresco (kg/m ³)
Referência	1788
15% PET	1716
30% PET	1645

Fonte: Elaboração própria

De acordo com a Tabela 19, no estado fresco os concretos com adição de 15% e 30% de PET apresentaram uma redução da massa específica de aproximadamente 4% e 8% em relação a mistura de referência (sem substituição de PET).

Com base na NBR 9778 (ABNT, 2005) foi determinada para os três concretos produzidos a massa específica da amostra seca, conforme Tabela 20.

Tabela 20 – Massa específica da amostra seca

Massa específica da amostra seca (kg/m³)			
Amostra	Referência	15 % PET	30% PET
1	1665	1504	1420
2	1548	1519	1445
Média	1607	1511	1432

Fonte: Elaboração própria

De acordo com a Tabela 20, no estado endurecido os concretos com adição de 15% e 30% de PET apresentaram uma redução da massa específica de aproximadamente 6% e 11% em relação a mistura de referência.

A Tabela 20 mostra que os valores de massa específica das amostras secas variaram cerca de 30% a 40% abaixo dos valores usualmente obtidos em concretos convencionais (considerando concreto convencional de massa específica 2400 kg/m³). Os concretos apresentaram massa específica inferior a 2000 kg/m³, classificados como concretos leves de acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2015).

4.1.2 Absorção de água e índice de vazios

Seguindo a NBR 9778 (ABNT, 2005) foram determinados para os concretos investigados (referência, com substituição de 15% PET e 30% PET) os valores de absorção de água apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Absorção de água

Absorção (%)			
Amostra	Referência	15 % PET	30% PET
1	7,89	8,73	9,60
2	7,87	8,90	9,78
Média	7,88	8,81	9,69

Fonte: Elaboração própria

Observa-se na Tabela 21 uma tendência de crescimento da absorção de água com o aumento do teor de PET nos concretos. A Tabela 22 apresenta a variação do aumento da absorção de água dos concretos estudados.

Tabela 22 – Variação da Absorção de água

Δ Absorção de água		
REF → 15% PET	REF → 30% PET	15% PET → 30% PET
12%	23%	10%

Fonte: Elaboração própria

Observa-se que o aumento substituição de areia de PET promoveu um aumento da absorção de água nos concretos. Com base também na NBR 9778 (ABNT, 2005) determinou-se o índice de vazios dos concretos, os quais são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Índice de vazios

Índice de vazios (%)			
Amostra	Referência	15 % PET	30% PET
1	13,13	13,12	13,63
2	12,18	13,52	14,12
Média	12,65	13,32	13,88

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 23 mostra uma tendência de crescimento do índice de vazios com o aumento do teor de PET nos concretos. Os concretos com teores de PET de 15% e 30% apresentaram um índice de vazios médio superior à amostra de referência, sendo de 5% e 9,7%, respectivamente.

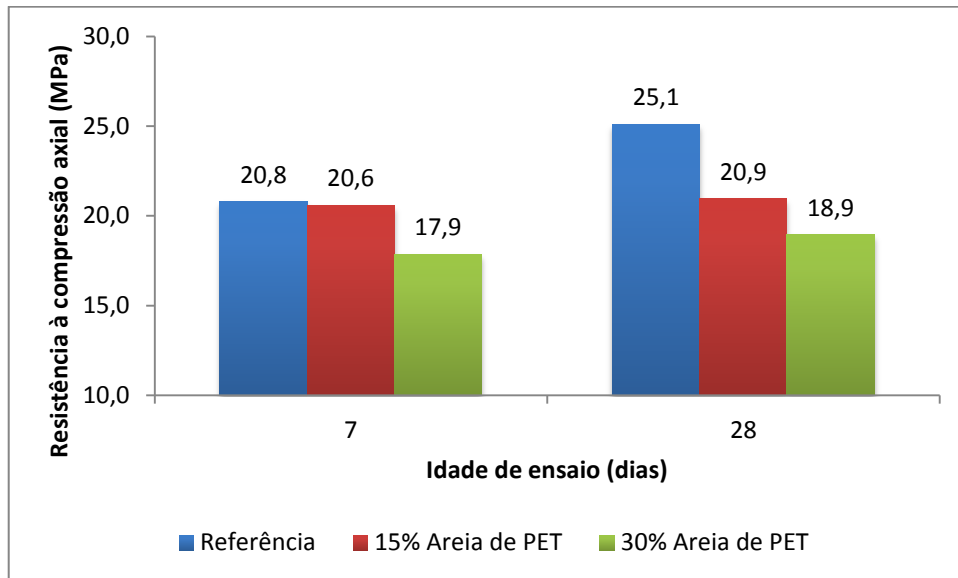
4.2 Caracterização das propriedades mecânicas

Os resultados de resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão serão apresentados nos próximos itens.

4.2.1 Resistência à compressão axial

Os valores médios de resistência à compressão axial para os concretos estudados (referência, 15 % PET, 30% PET) são apresentados no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Valores médios de resistência à compressão axial



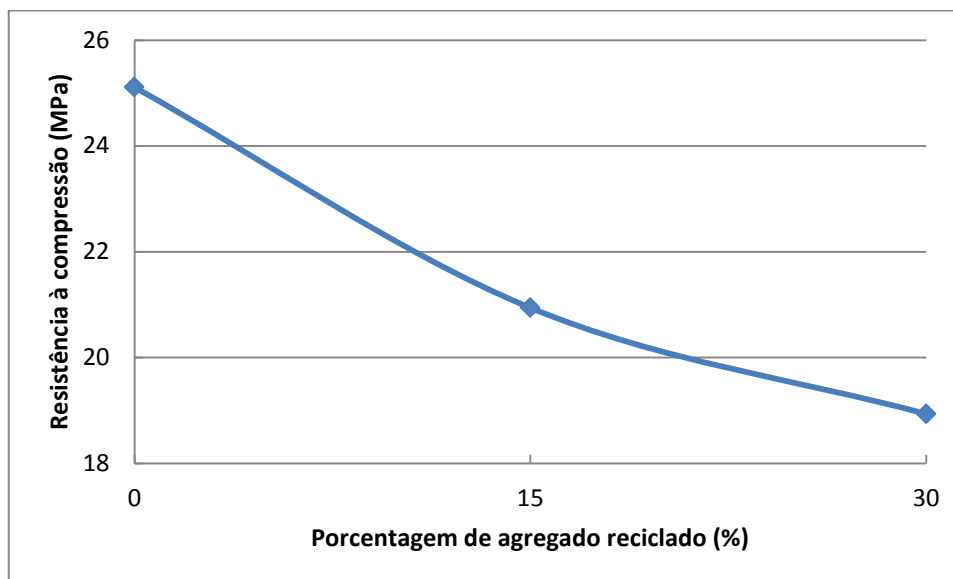
Fonte: Elaboração própria

Analisando os resultados médios de resistência à compressão axial do Gráfico 1, observa-se uma tendência de crescimento da resistência com a variação da idade de controle (7→28 dias) dos concretos.

O Gráfico 1 também mostra uma tendência de redução da resistência à compressão axial com o aumento da substituição de PET, para ambas as idades de controle (7 e 28 dias). Na idade de controle 7 dias, as misturas com substituição parcial de 15% e 30% de Areia de PET apresentaram uma redução da resistência à compressão axial em relação ao concreto referência, de 1% e 14%, respectivamente. Para a idade de controle de 28 dias, os concretos com substituição parcial de 15% e 30% de Areia de PET apresentaram uma redução da resistência à compressão axial em relação ao concreto referência de 16,6% e 24,6%, respectivamente.

O Gráfico 2 apresenta os valores médios de resistência à compressão axial em função da porcentagem de agregado reciclado utilizado, para a idade de 28 dias.

Gráfico 2 – Resistência à compressão axial média em função do teor de agregado reciclado para a idade de 28 dias



Fonte: Elaboração própria

Assim, observa-se no Gráfico 2 uma tendência de redução da resistência à compressão axial com o aumento do teor de agregado reciclado de PET nos concretos.

Objetivando avaliar a real influência das variáveis independentes (Teor de PET e idade de ensaio) na variável de resposta (resistência à compressão axial) realizou-se uma análise de variância (ANOVA), cujos resultados são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão axial

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	Significância (p)
Intercepto	7712,820	1	7712,820	889,8541	0,000000
Teor PET	61,998	2	30,999	3,5765	0,060489 Não
Idade	16,627	1	16,627	1,9183	0,191248 Não
TeorPET*IdadeEnsaio	13,408	2	6,704	0,7735	0,483103 Não
Erro	104,010	12	8,668		

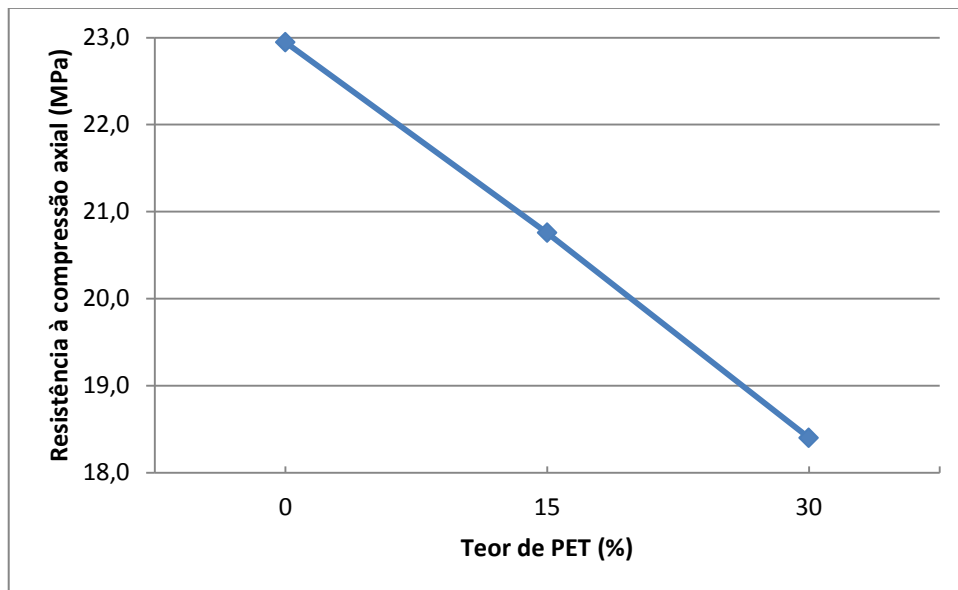
Fonte: Elaboração própria

A análise de variância (Tabela 24) mostra que as variáveis independentes estudadas (“Teor de PET” e “Idade de Ruptura”), não se mostraram significativas

(uma vez que $p > 0,05$). Ou seja, as variáveis independentes não influenciaram a variável de resposta. A interação entre os fatores "teor de PET x idade de ensaio" também não se mostrou significativa ($p > 0,05$).

O Gráfico 3, gerado a partir das informações da ANOVA, mostra a influência do teor de PET na resistência à compressão axial.

Gráfico 3 – Influência do teor de PET na resistência à compressão axial

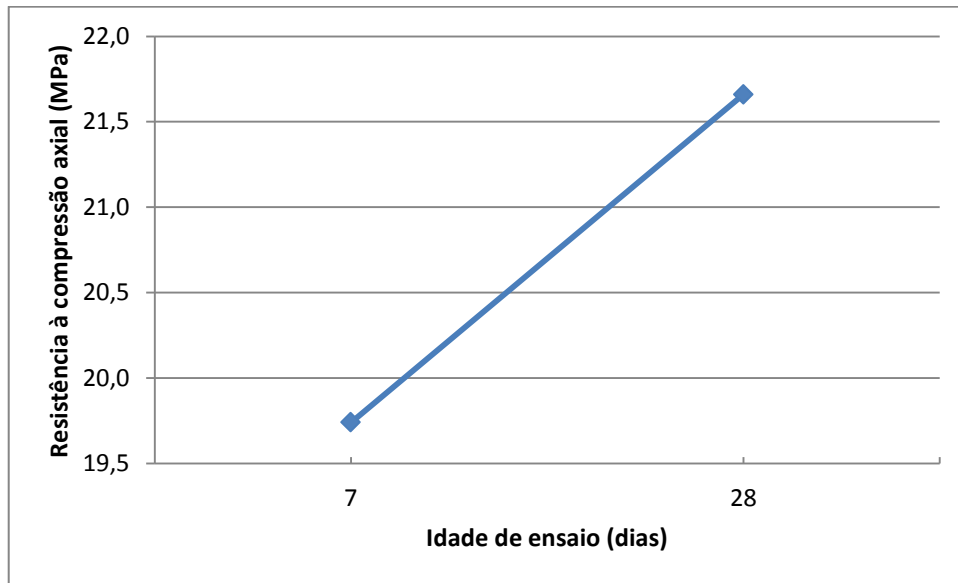


Fonte: Elaboração própria

Desse modo, o Gráfico 3 mostra uma tendência de redução da resistência à compressão axial com o aumento do teor de PET nos concretos. Entretanto, a análise estatística (Tabela 24) mostra que “matematicamente” não existe diferença entre os resultados, ou seja, os teores de PET incorporados aos concretos não influenciaram os resultados de resistência à compressão axial para as idades de 7 e 28 dias.

O Gráfico 4, obtido a partir da ANOVA, apresenta a resistência à compressão axial média nas idades de controle.

Gráfico 4 – Resistência à compressão axial média nas idades de controle



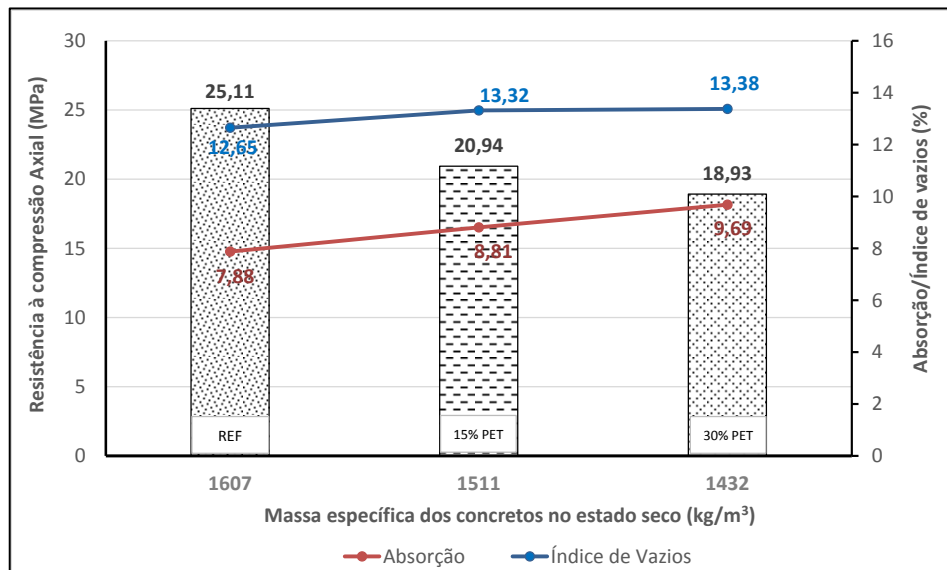
Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 4 mostra que existe uma tendência de crescimento da resistência à compressão axial com o aumento da idade de controle. No entanto, para este estudo, essa variável não se mostrou significativa. De acordo com a análise estatística não existe diferença matemática entre os resultados de resistência à compressão axial nas idades de 7 e 28 dias.

Os resultados do Gráfico 4 podem ser explicados em função do cimento Portland utilizado na produção dos concretos. O cimento CPV ARI já adquire elevada resistência até os 7 dias. O crescimento dos 7→28 dias ocorre, porém é pequeno, provavelmente em função da finura e da composição química deste material.

O Gráfico 5 apresenta os valores médios de resistência à compressão axial aos 28 dias em função da massa específica dos concretos e dos seus índices físicos (absorção e índice de vazios).

Gráfico 5 – Resistência à compressão axial em função massa específica dos concretos e seus índices físicos



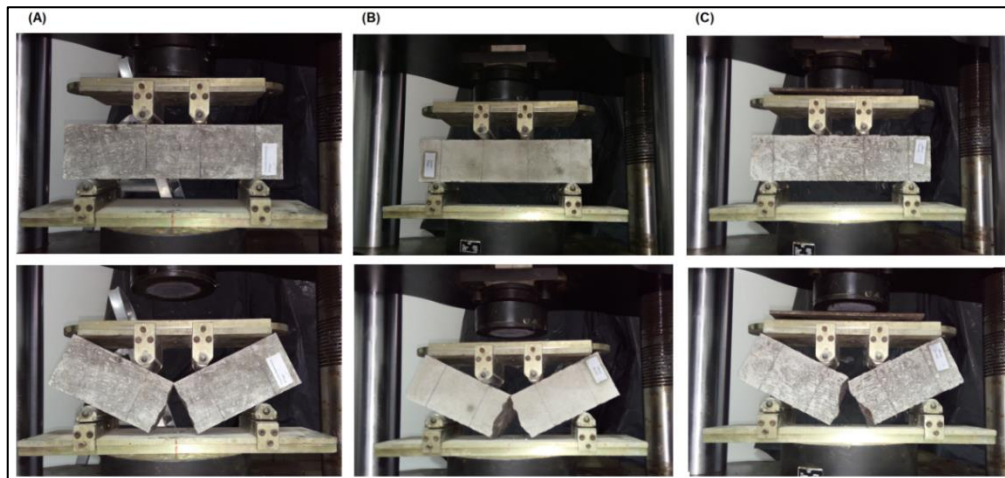
Fonte: Elaboração própria

Relacionando os valores de resistência à compressão com a massa específica dos concretos (Gráfico 5), observa-se que todos os concretos superaram a resistência mínima de 17 MPa (NM 35/1995, Tabela 2) para valores máximos de massa específica de 1680 kg/m³. Observa-se que o concreto de referência apresentou os melhores resultados entre os traços investigados, apresentando maior resistência à compressão axial e menor absorção e índice de vazios em relação às demais misturas. O aumento do teor de PET nas misturas promoveu uma redução da resistência à compressão axial e um aumento da absorção e do índice de vazios.

4.2.2 Resistência à tração na flexão

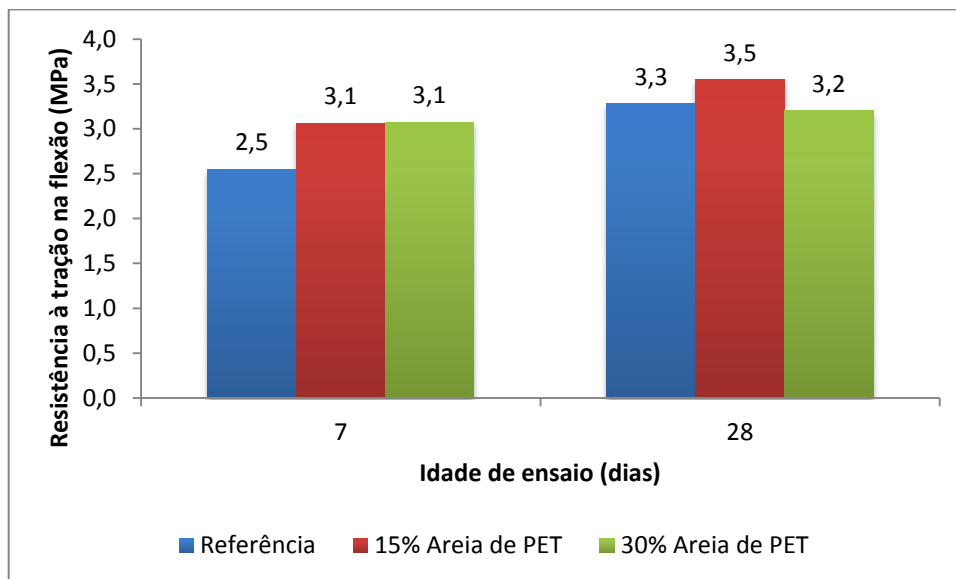
A Figura 22 mostra o ensaio de tração na flexão sendo aplicado em algumas das amostras e o Gráfico 6 apresenta os valores médios de resistência à tração na flexão para os concretos estudados (referência, 15 % PET, 30% PET).

Figura 22 – Ensaio de resistência à tração média na flexão: (A) Referência (B) 15 % PET, (C) 30% PET



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 6 – Valores médios de resistência à tração na flexão



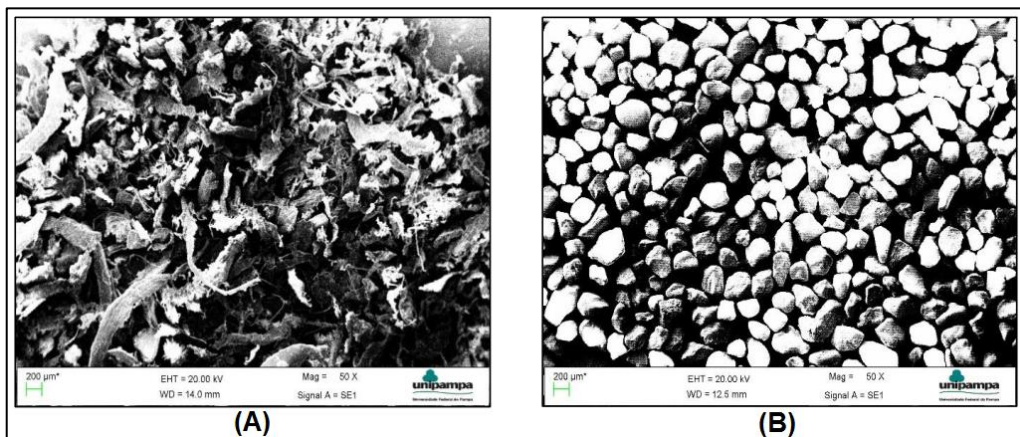
Fonte: Elaboração própria

A partir dos resultados médios do Gráfico 6, observa-se um aumento da resistência à tração na flexão nas três misturas com o aumento da idade de controle (7→28 dias). Na idade de controle 7 dias, as misturas com substituição parcial de 15% e 30% de Areia de PET apresentaram um aumento da resistência à tração na flexão em relação ao concreto referência, de 20% e 20,8%, respectivamente. Na idade de 28 dias, o concreto com substituição parcial de 15% apresentou um aumento de 8,2% da resistência à tração na flexão em relação ao concreto referência, entretanto, o concreto com substituição parcial de 30% apresentou uma redução de 2,4 % da resistência à tração na flexão em relação ao concreto

referência. Analisando os resultados, existe uma tendência do teor de 15% PET ser o teor ótimo para a resistência à tração na flexão, uma vez que apresentou o melhor resultado entre os traços investigados, na idade de controle 28 dias.

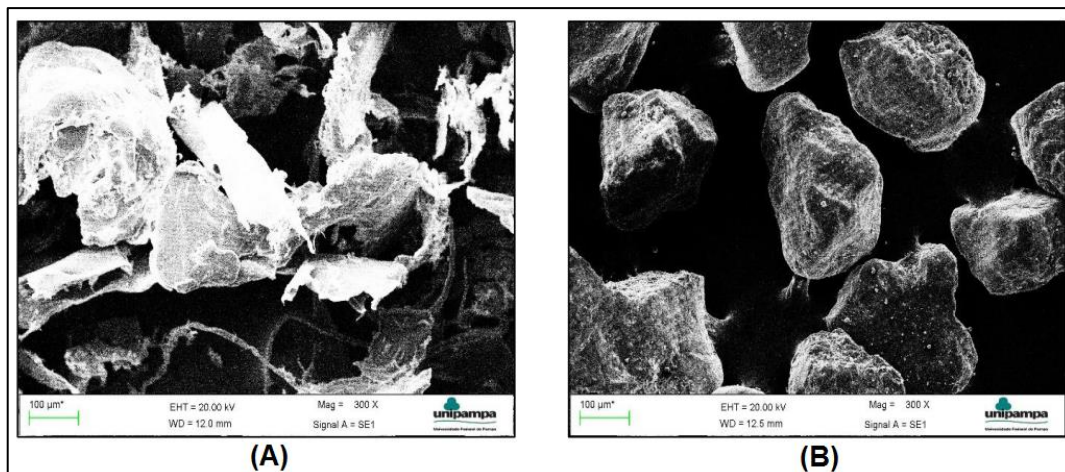
O formato da areia de PET pode explicar o aumento da resistência à tração para o Teor de 15 % PET. O estudo de Jardim (2017) faz uso da mesma areia de PET utilizada. A pesquisadora avaliou a forma dos agregados miúdos (areia natural e areia de PET) através de um microscópio eletrônico de varredura por elétrons secundários (MEV). As Figuras 23 e 24 apresentam as imagens de MEV dos agregados.

Figura 23 – Micrografia (MEV) dos agregados miúdos com ampliação de 50 vezes: (A) areia de PET e (B) areia natural



Fonte: Adaptado de Jardim (2017)

Figura 24 – Micrografia (MEV) dos agregados miúdos com ampliação de 300 vezes: (A) areia de PET e (B) areia natural



Fonte: Adaptado de Jardim (2017)

Analisando as Figuras 23 e 24, observa-se um formato mais esférico para a areia natural, enquanto que a areia de PET apresenta um formato mais lamelar assemelhando-se a uma fibra, o que pode ter contribuído para a melhora dos resultados de tração do traço com teor de 15% de PET.

Para avaliar a influência das variáveis independentes (Teor de PET e idade de ensaio) na variável de resposta, os dados passaram por uma análise de variância (ANOVA). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência à tração na flexão

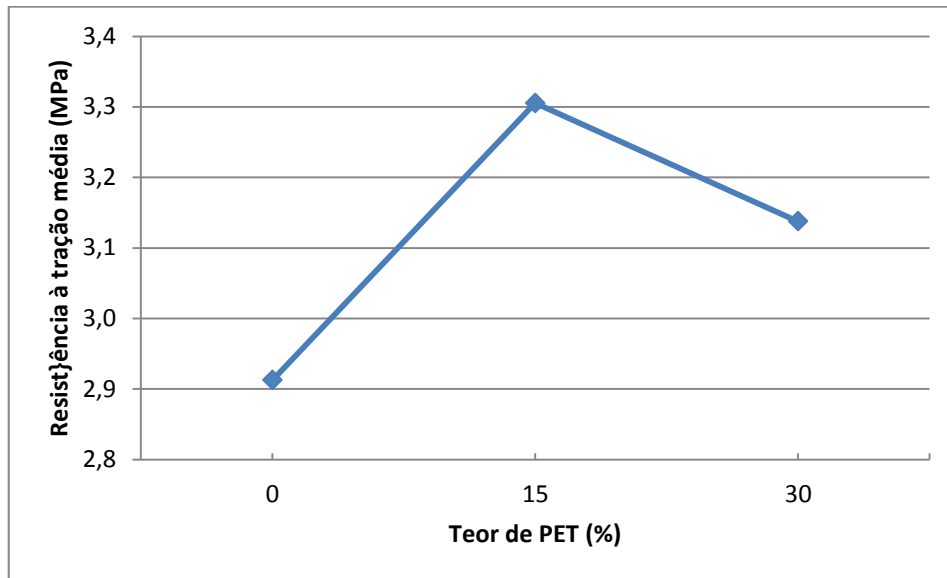
ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	Significância (p)	
Intercepto	175,0445	1	175,0445	4145,677	0,000000	
Teor de PET	0,4662	2	0,2331	5,521	0,019952	Sim
Idade de ensaio	0,9014	1	0,9014	21,348	0,000590	Sim
Teor de PET*Idade de ensaio	0,2818	2	0,1409	3,338	0,070388	Não
Erro	0,5067	12	0,0422			

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 25 mostra que as variáveis independentes (“Teor de PET” e “Idade de Ruptura”) foram classificadas como significativas ($p < 0,05$), ou seja, influenciaram na variável de resposta (resistência à tração na flexão). A interação entre os fatores “Teor de PET x Idade de ensaio” não se mostrou significativa ($p > 0,05$).

O Gráfico 7 mostra os valores médios de resistência à tração na flexão em função dos teores de PET dos concretos, obtidos a partir da ANOVA.

Gráfico 7 – Influência do teor de PET na resistência à tração na flexão



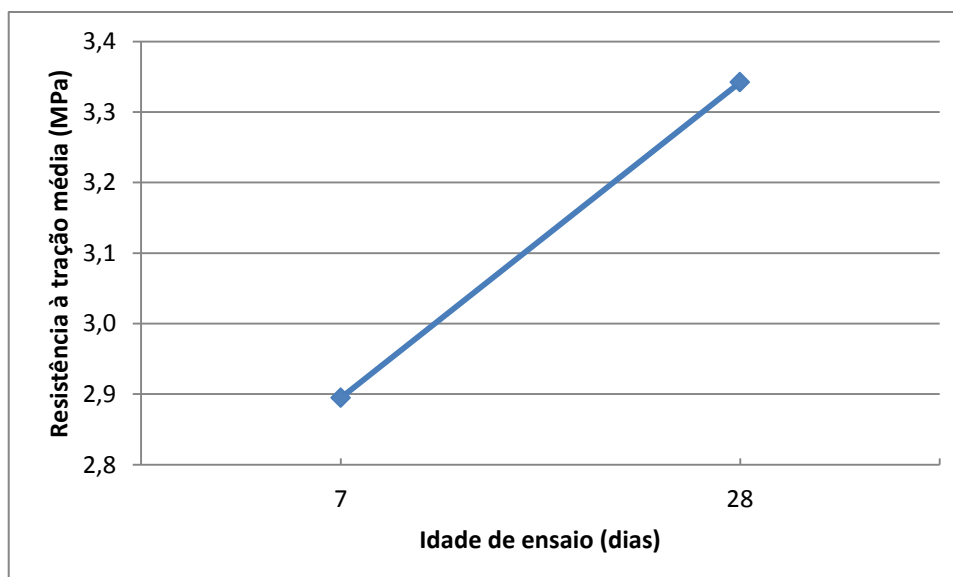
Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 7 demonstra uma tendência de crescimento da resistência à tração na flexão até o teor 15% PET (“teor ótimo”). A partir desse teor, ocorre um decréscimo da resistência.

A análise estatística (Tabela 25) mostra que o teor de PET influenciou na variável de resposta (resistência à tração na flexão), sendo possível afirmar que, para este estudo, o melhor teor para resistência à tração na flexão é o de 15%.

O Gráfico 8 mostra o comportamento da resistência à tração na flexão com a variação da idade de controle, obtidos a partir da análise de variância (ANOVA).

Gráfico 8 – Resistência à tração média na flexão nas idades de controle

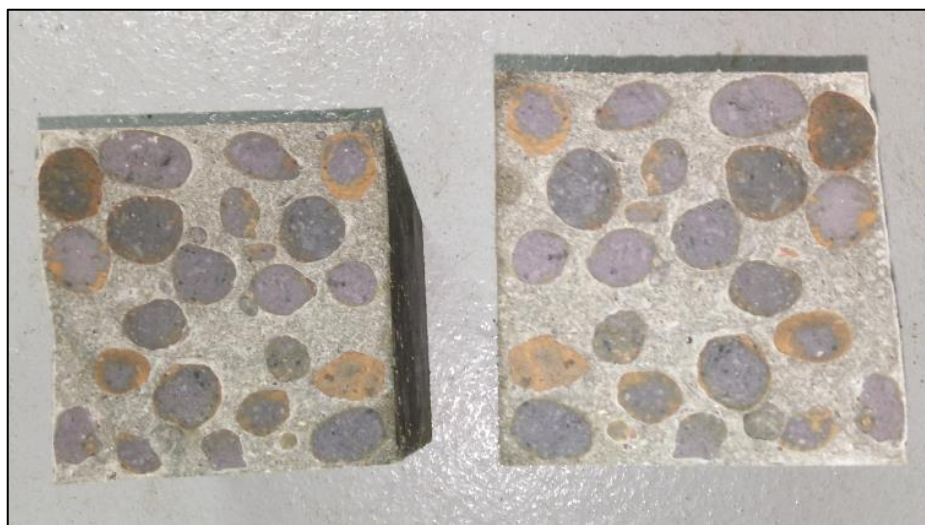


Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 8 mostra que existe uma tendência de crescimento da resistência à tração na flexão com o aumento da idade de controle. Para o ensaio de tração na flexão a variável idade influenciou na variável de resposta, ou seja, existe diferença matemática entre os resultados de tração na flexão obtidos aos 7 e aos 28 dias.

Por fim, a Figura 25 mostra de maneira geral a distribuição da argila expandida nas amostras ensaiadas na tração à flexão. Observa-se (Figura 25) uma boa distribuição dos agregados leves no corpo de prova.

Figura 25 – Corpo de prova prismático após ruptura por tração na flexão



Fonte: Elaboração própria

4.3 Avaliação da Condutividade Térmica

Os valores médios de condutividade térmica encontrados para os três concretos produzidos são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Valores de condutividade térmica dos concretos produzidos

Traço	Massa específica (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/mK)
Referência	1607	0,61
15% PET	1511	0,61
30% PET	1432	0,57

Fonte: Elaboração própria

Observando os valores da Tabela 25 e comparando aos valores da NBR 15220 (ABNT, 2005), mostrados na Tabela 7, os concretos produzidos apresentam massa

específica seca variando entre 1400-1600 kg/m³ e seus resultados de condutividade térmica são inferiores aos valores máximos da NBR 15220 (ABNT, 2005).

Angelin (2014) estudou a variação de teores de argila expandida 1506 no traço, variando de 0 a 100%. Relacionando os valores de massa específica e a utilização de 100% de agregado gráudo leve, a Tabela 27 apresenta o resultado encontrado no estudo, mostrando a proximidade aos resultados de condutividade térmica encontrados nesta pesquisa (Tabela 26).

Tabela 27 – Valores de condutividade térmica dos concretos produzidos

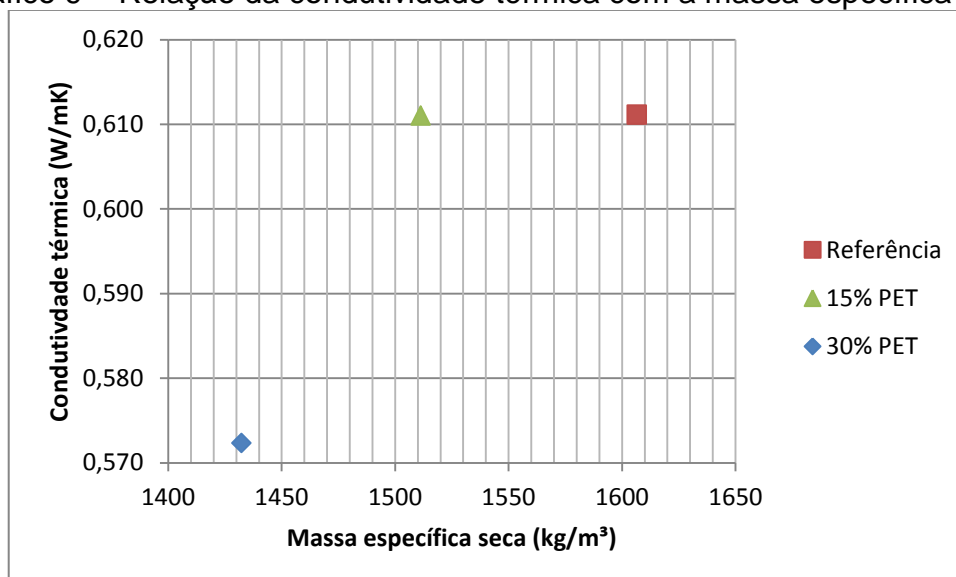
Argila expandida	Massa específica (kg/m ³)	Condutividade térmica média (W/mK)
CINEXPAN 1506	1687	0,61

Fonte: Adaptado de Angelin (2014)

Sacht, Rossignolo e Santos (2010) também estudaram a condutividade térmica utilizando a substituição total do agregado gráudo brita por agregado leve de argila expandida 1506. O Traço estudado com massa específica 1589 kg/m³ (próxima ao concreto referência) apresentou condutividade térmica 0,94 W/mK. Assim, comparando os concretos produzidos nesta pesquisa relacionando a massa específica x condutividade térmica, apresentam melhor desempenho.

O Gráfico 9 mostra a relação da condutividade térmica com a massa específica seca dos concretos.

Gráfico 9 – Relação da condutividade térmica com a massa específica seca



Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 9 mostra que os valores de condutividade térmica encontrados para as misturas de referência e com 15% PET são iguais. O concreto 30% PET apresentou uma redução de apenas 2% da condutividade térmica em relação à mistura de referência.

A fim de relacionar os valores de condutividade média dos concretos leves produzidos com o concreto convencional e também com materiais cerâmicos, apresenta-se na Tabela 28 a condutividade térmica destes materiais estabelecida pela NBR 15220 (ABNT, 2005).

Tabela 28 – Valores de condutividade térmica NBR 15220 (ABNT, 2005)

Material	ρ (kg/m ³)	Λ (W/(m.K))
Cerâmica		
tijolos e telhas de barro	1000-1300	0,70
	1300-1600	0,90
	1600-1800	1,00
	1800-2000	1,05
Concreto (com agregados de pedra)		
concreto normal	2200-2400	1,75

Fonte: Adaptado de NBR 15220 (ABNT, 2005)

Desse modo, comparando os valores da Tabela 28 com a condutividade térmica do concreto Referência produzido neste estudo, considerando sua massa específica seca aos 28 dias de 1607 kg/m³. O traço referência em relação ao material cerâmico tijolo ($\lambda = 1,00$ W/mK), possui cerca de 40 % menos condutividade térmica, relacionando valores com massa específica similares (1600-1800 kg/m³). Por fim, relacionando ao concreto convencional ($\lambda = 1,75$ W/mK), possui cerca de 65 % menos condutividade térmica. Assim, conclui-se que os concretos desenvolvidos apresentam um desempenho térmico eficiente quando comparados aos materiais citados, uma vez que, apresentaram uma diferença significativa de valores de condutividade térmica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados das propriedades mecânicas para os concretos com substituições foram considerados eficientes, ou seja, em relação ao concreto referência não se observaram perdas de resistência à compressão axial e de resistência a tração na flexão. Após a análise estatística dos dados experimentais, concluiu-se que os valores de resistência à compressão axial dos três traços produzidos são considerados matematicamente similares. Enquanto, para a resistência à tração na flexão foi observado um acréscimo dos valores nos traços contendo substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de PET, apontando assim um resultado interessante, uma vez que a areia de PET pode ter atuado como uma fibra nesta propriedade analisada.

Os concretos leves produzidos são considerados concretos estruturais, pois atingiram resistência à compressão superior à 17 MPa aos 28 dias, ou seja, a NBR NM 35 (ABNT, 1995) estabelece valores de resistências mínimas relacionadas a valores máximos de massa específica para classificação do concreto leve estrutural, a massa específica dos concretos leves variou de 1430 a 1600 kg/m³.

Quanto à condutividade térmica, os três concretos apresentaram valores satisfatórios, sendo que as substituições não apresentaram perda em relação ao concreto referência, ou seja, relacionado os concretos com substituição ao traço referência, o concreto com substituição de 15 % PET apresentou mesma condutividade e o concreto de 30 % PET apresentou melhor desempenho térmico.

O traço produzido pode ser aplicado em elementos pré-fabricados, entretanto, para que exista a viabilidade de aplicação deve se enquadrar nos valores de resistência à compressão encontrados, uma vez que obteve-se valor máximo de resistência à compressão de 25 MPa para o concreto referência.

Esta pesquisa objetivou o desenvolvimento de um concreto leve agregado a reutilização de resíduos, onde foi possível através da análise de algumas propriedades concluir a viabilidade da produção dos concretos. É possível levantar como um desafio a ser solucionado a trabalhabilidade das misturas, pois após a substituição os concretos sofreram significativas perdas de

abatimento, o que pode ocasionar dificuldade na moldagem destes concretos, especialmente para aplicação em painéis de vedação.

Por fim, ressalta-se que os resultados obtidos não podem ser generalizados, ou seja, os mesmos se restringem exclusivamente aos materiais e técnicas empregados neste estudo. Desse modo, novos estudos devem ser desenvolvidos para a validação dos resultados.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento da pesquisa e após a obtenção dos resultados dos parâmetros analisados, alguns aspectos referentes a produção e desenvolvimento da tecnologia dos concretos leves produzidos com agregado reciclado de PET mostraram-se relevantes para produções científicas futuras. Desse modo, apresentam-se algumas sugestões para estudos futuros:

- Estudo de dosagem a fim de proporcionar o desenvolvimento de uma mistura que apresente uma melhor trabalhabilidade comparada aos concretos desenvolvidos neste estudo, uma vez que na execução das substituições mesmo que apresentem perdas de abatimento, ainda produzam concretos com trabalhabilidade aceitável;
- Estudo de outros teores de substituição do agregado reciclado PET, uma vez que se obtiveram resultados mecânicos satisfatórios para os teores em estudo na pesquisa;
- Desenvolvimento de um traço que utilize mais de uma dimensão de argila expandida e com substituição de PET, podendo assim melhorar as propriedades mecânicas dos concretos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland (BT-106)**. 7 ed. São Paulo: ABCP, 2002. 28p.

ABIPET. **Panorama do Setor**. 2012a. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=36>>. Acesso em: 15 Abr, 2017.

ABIPET. **Resina PET – Fabricação**. 2012b. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=65>>.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. Guide for structural lightweight aggregate concrete. ACI – 213R-03. **ACI Manual of Concrete Practice**, Part 1, 27p. 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 330 - 05**: Standard Specification for Lightweight Aggregates for structural concrete. Philadelphia, 2014.

ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural – Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. 2014. 98p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia, área de concentração em Tecnologia e Inovação) – Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

ARAGON, A. T.; GHIRALDELLO, L. Produtos a base de polietileno (PET) na construção civil: um estudo diagnóstico no município de Poços de Caldas. **Revista Gestão e Conhecimento**, Poço de Caldas, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

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

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

_____. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Método do cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações – Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método do fluximétrico. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 35**: Agregados leves para concreto estrutural – Especificação. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BORJA, E. V. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis**. 2011. 230p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

CANELLAS, S. S. **Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassas**. 2005. 78p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CINEXPAN. **Argila expandida Cinexpan**. 2017a. Disponível em: <<http://www.cinexpan.com.br/argila-expandida-cinexpan.html>>. Acesso em: 30 Maio, 2017.

CINEXPAN. **Ficha Técnica da Argila expandida Tipo 2215**. 2017b. Disponível em: <<http://www.cinexpan.com.br/pdf/ficha-tecnica-2215.pdf>>. Acesso em: 30 Maio, 2017.

CINEXPAN. **Concreto leve estrutural**. 2017c. Disponível em: <<http://www.cinexpan.com.br/concreto-leve-estrutural.html>>. Acesso em: 30 Maio, 2017.

CORREA, P. M. **Estudo comparativo da influência da adição de PET e PP pós-consumo na produção do concreto estrutural**. 2015. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

FARIAS, N. E. A. **Estudo comparativo envolvendo o dimensionamento de edifícios com recurso a betão leve ou betão de densidade normal**. 2009. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

FERREIRA, C. N. G. **Dimensionamento de elementos estruturais em concreto leve**. 2015. 166p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

ISOLDI, A. B. G. **Estudo do efeito da dose de radioesterilização sobre as propriedades do poli(tereftalato de etileno) – PET reciclado**. 2003. 72p. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de de Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

ITAMBÉ. **Relatórios de ensaio**. 2017. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=371&chave=2017-6>>. Acesso: 10 Ago, 2017.

JARDIM, R. R. Estudo da viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo por agregado miúdo reciclado de PET em concretos convencionais. In: 51º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2017, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: IBRACON, 2017.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. O Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo, IBRACON, v.1, p.316, 2005.

LIMA, V. I. C. et al. **Concreto e suas inovações. Ciências exatas e tecnológicas**, Maceió, v.1, n.1, p. 31-40, maio 2014.

MAYCÁ, J.; RECENA, F. A. P.; CREMONINI, R. A. Estudo da resistência à compressão de concretos leves produzidos com argila expandida nacional. In: 51º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 3d. Berkeley: McGraw-Hill, 2006.

MODRO, N. L. R. **Desenvolvimento e caracterização de concreto de cimento Portland contendo resíduos poliméricos de PET**. 2008. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2008.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. São Paulo: Bookman Editora Ltda, 2013.

PAIVA, P. A.; RIBEIRO, M. S. A reciclagem na construção civil: como economia de custos. REA. **Revista Eletrônica de Administração (Franca. Online)**, v.4, n.1, p. 1-15, 2005.

PEREIRA, M. R. **Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos leves**. 2008. 82p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Aproveitamento de resíduos na construção. In: ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. (Ed.) **Coletânea Habitaré, v.4**. Porto Alegre: ANTAC, 2003. P 73-93.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – Dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 2003. 211p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Interunidades EESC/IFSC/IQSC da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Concreto leve estrutural. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo, IBRACON, v.2, p.1333-1362, 2005.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. São Paulo: Pini, 2009.

ROSSIGNOLO, J. A.; FERRARI, C. Desenvolvimento de concreto leve para execução de habitações de interesse social: sistema construtivo de painéis monolíticos moldados in loco. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE QUALIDADE E INOVAÇÃO NA CONSTRUÇÃO – QIC2006. **Anais...** Lisboa, v.2, p.827-37, 2006.

SACHT, H. M. **Painéis de vedação de concreto moldados in loco: avaliação do desempenho térmico e desenvolvimento de concretos**. 2008. 286p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2008.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A. Habitações multipavimentos de interesse social: o uso de vedações em concreto e a influência da massa específica do painel no conforto térmico. **Revista Minerva**, v.5, n.1, p.25-34, 2008a.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A. Paredes de concreto moldadas in loco: Influência da massa específica e da espessura do painel no conforto térmico de habitações térreas de interesse social no estado de São Paulo. In: 50º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** São Paulo, v.1, p.1-14, 2008b.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. N. Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida. **Revista Matéria**, v.15, n.1, p. 31-39, 2010.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; REZENDE NETO, J. I. Habitações térreas de interesse social: o uso de vedações em concreto com diferentes massas específicas e as condições de conforto térmico no estado de São Paulo. In: NUTAU 2008 – SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO NÚCLEO DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DA ARQUITETURA E URBANISMO DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Anais...** São Paulo, v.1, p.1-11, 2008.

VAZ, C. E. Avaliação de desempenho de argamassa modificada com areia de PET. In: 51º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2017, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: IBRACON, 2017.