

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ESTÂNCIA

DIRETORIA DE ENSINO

COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ NILTON SOARES SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO LEVE DE ARGILA EXPANDIDA
MODIFICADO COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU**

MONOGRAFIA

ESTÂNCIA

2019

JOSÉ NILTON SOARES SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO LEVE DE ARGILA EXPANDIDA
MODIFICADO COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU**

Monografia apresentada como requisito parcial
à obtenção do título de Bacharel, da
Coordenação do Curso de Engenharia Civil, do
Instituto Federal de Sergipe – Campus
Estância.

Orientadora: Prof(a). Ma. Vanessa Gentil de
Oliveira Almeida Silva

ESTÂNCIA

2019

Santos, José Nilton Soares.
S237d Desenvolvimento de concreto leve de argila expandida modificado com resíduo de
borracha de pneu. / José Nilton Soares Santos. – Estância, 2019.
95f.; il.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Sergipe – IFS. Coordenação do Curso de Engenharia Civil.
Orientador: Profa. Ma. Vanessa Gentil de Oliveira Almeida Silva.

1. Concreto leve. 2. Argila expandida. 3. Resíduo de borracha de pneu. I.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe - IFS. II. Silva,
Vanessa Gentil de Oliveira Almeida. III. Título.

CDU: 624:691.32



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE
Av. Jorge Amado, 1551 – Loteamento Garcia, Bairro Jardins - CEP 49025-330 – Aracaju/SE
Fone: (79) 3711 1400 – E-mail: reitoria@ifse.edu.br

APÊNDICE 8 – ATA DA VALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE
CURSO (sem co-orientador)

CURSO DE ENG CIVIL

Aos 28 de MAIO de dois mil e 19, às 9:00h, pelo Curso de
ENG CIVIL do Instituto Federal de Sergipe, instalou-se a Comissão Julgadora da
apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do (a) estudante (a):
JOSÉ NIKTON SOARES SANTOS

Composta pelos (as) docentes:

HERBET ALVES DE OLIVEIRA
DAVID DE PAIVA GOMES NETO

a fim de proceder a arguição pública e avaliação do TCC do(a) candidato(a),

intitulado: DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO LEVE DE ARC EXPAN-
SIDA MODIFICADO C/ RESÍDUO DE BARRICA PIVU

Aberta a sessão, o(a) presidente da Comissão Julgadora autorizou o início da apresentação. Após
a apresentação do trabalho, foi realizada arguição e na sequência a Comissão Julgadora se reuniu
para a atribuição do conceito final.

De acordo com o REGULAMENTO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO, o (a)
candidato

(a)

foi considerado(a) APROVADO com conceito final 9,2

Assinam:

Prof (a). Orientador (a): Vanessa Gentil de O. Almeida

Examinador (a): Herbet Alves de O.

Examinador (a): David de Paiva Gomes Neto

28 de MAIO de 2019.

Dedico este trabalho a Deus que iluminou
o meu caminho durante esta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Sou grato por ter convivido com tantas pessoas durante esses 5 anos de graduação e ter aprendido diversas coisas com cada um que passou na minha vida. Minha gratidão antes de tudo é de Deus, que me deu a verdadeira paz e trouxe-me para a essência do que sou hoje.

Sou grato a minha mãe, Luzinete Soares Santos, que sempre me apoiou incondicionalmente e me deu todo o suporte e exemplo para chegar até aqui.

Ao meu melhor amigo Mauricio Lourenço Rodrigues da Silva, que apesar das dificuldades que passei durante o curso, me fortaleceu, me apoiou e incentivou a continuar estudando, e que para mim foi muito importante.

Agradeço aos meus colegas de turma, em especial as minhas amigas Anny Salomny Santos Nascimento e Jéssica Soares dos Santos Paes, companheiras de trabalhos e irmãs de amizade, e pela convivência durante todos esses anos.

A todos os amigos, especialmente a Daniel de Oliveira Venceslau, Dayane Araújo Silveira dos Santos, Larissa Isabelle Conceição da Silva, Railson Gabriel da Silva Dias e Vera Lúcia Costa dos Santos, meu muito obrigado. Vocês foram fundamentais para minha formação, por isso merecem o meu eterno agradecimento.

As técnicas de laboratório Mandarlan Hallei Nascimento Pereira, Jucicléa Santos Alves e a assistente de laboratório Suellen Regina Araújo Batista Pereira pela ajuda e apoio durante todas as fases de experimentos desta pesquisa, ficarei eternamente agradecido.

Agradeço a minha orientadora Professora Vanessa Gentil de Oliveira Almeida Silva, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Ao Departamento de Construção Civil da Universidade Federal de Sergipe, pela oportunidade de uso dos equipamentos de ensaios mecânicos e suporte técnico para a realização desta pesquisa.

As empresas CINEXPAN S.A e a SERGITARYS INDUSTRIAL, pelo fornecimento dos materiais utilizados na pesquisa.

A PROPEX, pela bolsa concedida para a pesquisa.

RESUMO

SANTOS, José Nilton. **Desenvolvimento de Concreto leve de argila expandida modificado com resíduo de borracha de pneu**. 95 páginas. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Estância. 2019.

O concreto leve tem como principal característica a baixa densidade em relação ao concreto convencional, devido a incorporação de materiais leves como a argila expandida. Nessa pesquisa foi incorporado resíduo de borracha de pneu que apresenta baixa massa específica com o fim de reaproveitá-lo como matéria-prima, reduzindo o impacto ambiental. Este trabalho tem como objetivo de estudo a aplicação de resíduo de borracha de pneus em concreto leve de argila expandida. Foi desenvolvido um programa experimental para análise desses concretos, variando o percentual de 1, 2.5 e 5% do resíduo de borracha de pneu em substituição ao agregado miúdo natural e substituindo 100% o agregado graúdo natural por argila expandida (50% de argila expandida C1506 e 50% de argila expandida C2215). Os materiais (cimento, areia, argilas expandidas e resíduo de borracha de pneu) foram caracterizados através de ensaios físicos com normas específicas. O concreto no estado endurecido foi avaliado através de ensaios mecânicos de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral, além dos ensaios físicos de absorção de água e massa específica. A utilização da argila expandida e 1% de resíduo de borracha de pneu garantiram melhores resistências mecânicas, menor absorção de água e maior massa específica do que as misturas com 2,5 e 5%, chegando a valores próximos ao concreto referência.

Palavras-Chave: concreto leve, argila expandida, resíduo de borracha de pneu.

ABSTRACT

SANTOS, José Nilton. **Desenvolvimento de Concreto leve de argila expandida modificado com resíduo de borracha de pneu**. 95 páginas. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Estância. 2019.

Light concrete has as main characteristic low density compared to conventional concrete, due to the incorporation of light materials such as expanded clay. In this research was incorporated tire rubber residue that presents low specific mass in order to reuse it as raw material, reducing the environmental impact. This work aims to study the application of rubber tire residue in lightweight expanded clay concrete. An experimental program was developed to analyze these concretes, varying the percentage of 1, 2.5 and 5% of the tire rubber residue in replacement of the natural aggregate and replacing 100% the natural aggregate with expanded clay (50% expanded clay C1506 and 50% expanded clay C2215). The materials (cement, sand, expanded clays and rubber tire residue) were characterized by physical tests with specific standards. The concrete in the hardened state was evaluated by mechanical tests of resistance to axial compression, modulus of elasticity and tensile strength by diametral compression, in addition to physical tests of water absorption and specific mass. The use of expanded clay and 1% of rubber tire residue ensured better mechanical strength, lower water absorption and higher specific mass than 2.5 and 5% mixtures, reaching values close to the reference concrete.

Keywords: lightweight concrete, expanded clay, rubber tire residue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coliseu de Roma.....	23
Figura 2 - Panteão.....	23
Figura 3 - Embarcação USS Selma	23
Figura 4 - Ponte São Francisco-Oakland	24
Figura 5 - Austrália Square.....	24
Figura 6 - Agregados leves e suas utilizações	25
Figura 7 - Forno rotativo para produção de argila expandida.....	27
Figura 8 - Micrografia (MEV) dos agregados produzidos pelos processos de sinterização (a) e forno rotativo (b)	28
Figura 9 - Processo de produção da argila expandida por forno rotativo	29
Figura 10 - Argilas expandidas: A) 3222; B) 2215; C) 1506; D) 0500 e E) 2,5	30
Figura 11 - Relação entre resistência à compressão e massa específica do concreto leve com argila expandida.....	33
Figura 12 - Relação entre resistência à compressão do concreto leve e a dimensão máxima característica do agregado leve nacional	34
Figura 13 - Relação entre resistência à compressão e massa específica do concreto leve com argila expandida.....	35
Figura 14 - Forma de ruptura dos concretos com agregados leves (à esquerda) e com agregados convencionais - basalto (à direita)	35
Figura 15 - Comportamento da curva tensão-deformação dos concretos leves	36
Figura 16 - Estrutura do pneu.....	39
Figura 17 - Acúmulo de pneus inservíveis	40
Figura 18 - Queima de pneus inservíveis.....	42
Figura 19 - Curva granulométrica do resíduo de borracha de pneu	44
Figura 20 - Trabalhabilidade do concreto produzido com resíduo de pneu.....	45
Figura 21 - Curva de carga x deformação de concretos com adição de borracha de pneu	46
Figura 22 - Fluxograma do programa experimental	49
Figura 23 - Processo de recauchutagem do pneu: A) Entrega do pneu, B) Inspeção ou limpeza, C) Raspagem do pneu, D) Pneu raspado, E) Local de armazenamento do resíduo de pneu, F) Aplicação da nova banda de rodagem, G) Forma com desenhos dos sulcos, H) Prensa mecânica, (I) Retirada do pneu da prensa, (J) Inspeção e resfriamento.....	51
Figura 24 - Resíduo de borracha de pneu.....	52
Figura 25 - Argila expandida C1506 (à esquerda) e C2215 (à direita)	52

Figura 26 - Ensaio de módulo de finura do cimento	53
Figura 27 - Ensaio de consistência normal	54
Figura 28 - Aparelho de Vicat.....	54
Figura 29 - Frasco de Le Chatelier.....	55
Figura 30 - Ensaio de expansibilidade do cimento	55
Figura 31 - Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo natural	56
Figura 32 - Determinação da massa unitária do agregado miúdo natural.....	57
Figura 33 - Determinação da massa específica do agregado miúdo natural	57
Figura 34 - Ensaio de granulometria das argilas expandidas C1506 (à esquerda) e C2215 (à direita)	58
Figura 35 - Determinação da massa unitária da argila expandida	58
Figura 36 - Determinação da composição granulométrica do resíduo de borracha de pneu	59
Figura 37 - Determinação da massa unitária do resíduo de borracha de pneu.....	60
Figura 38 - Determinação da massa específica do resíduo de borracha de pneu	60
Figura 39 - Sílica ativa (à esquerda) e Superplastificante (à direita)	61
Figura 40 - Placas das misturas de concreto	63
Figura 41 - Corpos de prova cilíndricos.....	63
Figura 42 - Betoneira com capacidade de 200 litros	64
Figura 43 - Moldagem dos corpos de prova pelo método de adensamento manual .	65
Figura 44 – Desmoldagem dos corpos de prova.....	66
Figura 45 – Corpos de.....	66
Figura 46 - Ensaio de abatimento do tronco de cone.....	66
Figura 47 - Balança hidrostática.....	67
Figura 48 - Corpos de prova na estufa.....	68
Figura 49 – A) Corpo de prova sendo retificado; B) Resultado do processo de retificação.....	69
Figura 50 - Ensaio de resistência à compressão axial	69
Figura 51 - Ensaio do Módulo de Elasticidade	69
Figura 52 - Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural.....	72
Gráfico 2 - Curva granulométrica das argilas expandidas C1506 e C2215.....	74
Gráfico 3 - Curva granulométrica do resíduo de borracha de pneu.....	75
Gráfico 4 - Resistência à compressão axial, aos 28 dias, do concreto leve referência (CR) e concretos leves com borracha (CB1%, CB2.5% e CB5%)	79
Gráfico 5 - Tensão x deformação para a resistência à compressão axial	80
Gráfico 6 - Módulo de Elasticidade, aos 28 dias, do concreto leve referência (CR) e concretos leves com borracha (CB1%, CB2.5% e CB5%).....	81
Gráfico 7 - Resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, do concreto leve referência (CR) e concretos leves com borracha (CB1%, CB2.5% e CB5%)	82
Gráfico 8 - Tensão x deformação para resistência à tração por compressão diametral	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores de massa específica dos concretos leves	22
Quadro 2 - Classificação dos agregados segundo a massa unitária.....	24
Quadro 3 - Resultado da massa específica em concreto leve	33
Quadro 4 - Resultados de absorção de água por imersão em concretos convencionais e concretos leves de diferentes autores	34
Quadro 5 - Materiais componentes do pneu	38
Quadro 6 - Composição de borracha de pneu, porcentagem e finalidades	39
Quadro 7 - Massa unitária e Massa Específica do resíduo de borracha de pneu	44
Quadro 8 - Resumo dos procedimentos experimentais	50
Quadro 9 - Módulo de finura do resíduo de borracha de pneu de diferentes autores	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Traço do concreto leve de argila expandida com resíduo de borracha de pneu	63
Tabela 2 - Propriedades físicas e químicas do cimento	71
Tabela 3 - Análise granulométrica do agregado miúdo natural	72
Tabela 4 - Análise granulométrica da argila expandida (C1506).....	73
Tabela 5 - Análise granulométrica da argila expandida (C2215).....	73
Tabela 6 - Análise granulométrica do resíduo de borracha de pneu	74
Tabela 7 - Ensaio de caracterização das matérias-primas.....	76
Tabela 8 - Absorção de água por imersão e massa específica, aos 28 dias de idade, do concreto referência e dos concretos com 1, 2.5 e 5% de resíduo de borracha de pneu	77
Tabela 9 - Resistência à compressão axial, resistência à compressão diametral e módulo de elasticidade aos 28 dias	78
Tabela 10 - Pesos das placas de concreto	83

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E AGRÔNIMOS

a.C.	Antes de Cristo
d.C.	Depois de Cristo
MPa	Mega Pascal
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
mm	Milímetro
m	metro
NBR	Norma brasileira
NM	Norma mercosul
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
GPa	Gigapascal
ACI	American concrete institute
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
km	Quilômetro
m ³	Metro cúbico
CP II F	Cimento Portland composto com fíler
KN	KiloNewton
g/cm ³	Grama por centímetro cúbico
CR	Concreto referência
CB1	Concreto com 1% de resíduo de borracha de pneu
CB2.5	Concreto com 2.5% de resíduo de borracha de pneu
CB5	Concreto com 5% de resíduo de borracha de pneu

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	JUSTIFICATIVA.....	18
3	OBJETIVO.....	20
3.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
4	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
5	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
5.1	CONCRETO LEVE	22
5.1.1	Desenvolvimento Histórico do Concreto Leve	22
5.2	AGREGADO LEVE	24
5.2.1	Classificação do agregado leve.....	25
5.2.2	Processo de fabricação do agregado leve	26
5.2.2.1	Sinterização.....	26
5.2.2.2	Forno rotativo	26
5.3	ARGILA EXPANDIDA.....	28
5.4	USINA DA CINASITA.....	28
5.5	PRODUÇÃO DO CONCRETO LEVE.....	30
5.5.1	Mistura.....	30
5.5.2	Transporte, Lançamento e Adensamento	31
5.5.3	Cura.....	31
5.6	TRABALHABILIDADE DO CONCRETO LEVE NO ESTADO FRESCO	32
5.7	PROPRIEDADES DO CONCRETO LEVE NO ESTADO ENDURECIDO	32
5.7.1	Massa Específica	32
5.7.2	Absorção de Água.....	33
5.7.3	Resistência à Compressão Axial.....	34
5.7.4	Comportamento da Curva Tensão-Deformação.....	36
5.7.5	Resistência à Tração por Compressão Diametral	36
5.8	RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU	37
5.8.1	História da Borracha de Pneu	37
5.8.2	Composição dos Pneus	38
5.8.3	Impactos Oriundos Pela Disposição Irregular de Pneus.....	40
5.8.4	Reciclagem de Pneus Inservíveis	41
5.8.5	Formas de Reciclagem	41
5.8.5.1	Pirólise.....	41

5.8.5.2	Queima de pneus	42
5.8.5.3	Trituração	42
5.8.5.4	Recauchutagem	43
5.8.6	Utilização de Resíduos de Borracha em Concretos de Cimento Portland	43
5.8.7	Propriedades do Concreto com Resíduo de Pneu.....	44
5.8.7.1	Aspectos de trabalhabilidade.....	44
5.8.7.2	Massa específica.....	45
5.8.7.3	Resistencia à compressão	45
5.8.8	Aplicação na Construção Civil	47
6	METODOLOGIA	49
7	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	50
7.1	COLETA DO RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU	50
7.2	OBTENÇÃO DA ARGILA EXPANDIDA.....	52
7.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	53
7.3.1	Caracterização do Cimento Portland.....	53
7.3.1.1	Módulo de finura.....	53
7.3.1.2	Consistência normal.....	54
7.3.1.3	Tempo de pega	54
7.3.1.4	Massa específica.....	55
7.3.1.5	Expansibilidade do cimento.....	55
7.3.2	Caracterização do Agregado Miúdo Natural.....	56
7.3.2.1	Análise granulométrica	56
7.3.2.2	Massa unitária	56
7.3.2.3	Massa específica.....	57
7.3.3	Caracterização da Argila Expandida	57
7.3.3.1	Análise granulométrica	58
7.3.3.2	Massa unitária	58
7.3.4	Caracterização do Resíduo de Borracha de Pneu	59
7.3.4.1	Análise granulométrica	59
7.3.4.2	Massa unitária	59
7.3.4.3	Massa específica.....	60
7.4	SUPERPLASTIFICANTE E SÍLICA ATIVA	60
7.5	ÁGUA	61
7.6	DOSAGEM DOS MATERIAIS	62
7.7	PRODUÇÃO DO CONCRETO LEVE.....	63
7.7.1	Mistura.....	64

7.7.2 Adensamento	65
7.7.3 Cura.....	65
7.8 PROPRIEDADES AVALIADAS	66
7.8.1 Trabalhabilidade	66
7.8.2 Absorção de Água e Massa Específica	67
7.8.3 Resistência à Compressão Axial	68
7.8.3.1 Módulo de Elasticidade	69
7.8.4 Resistência à Tração Por Compressão Diametral.....	69
8 RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
8.1 CIMENTO PORTLAND	71
8.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS	71
8.2.1 Análise Granulométrica	72
8.2.1.1 Agregado miúdo natural (areia).....	72
8.2.1.2 Argila expandida.....	73
8.2.1.3 Resíduo de borracha de pneu	74
8.2.2 Massa Unitária e Massa Específica	75
8.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	76
8.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	76
8.4.1 Propriedades Físicas.....	77
8.4.1.1 Absorção de água e massa específica.....	77
8.4.2 Propriedades Mecânicas	78
8.4.2.1 Resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral	78
8.5 PLACAS DE CONCRETO LEVE.....	83
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
9.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
REFERÊNCIAS.....	87

1 INTRODUÇÃO

O concreto convencional, produzido a partir cimento Portland e agregados naturais (areia e brita), é o material da construção civil mais utilizado em todo o mundo, devido aos seus componentes serem facilmente encontrados e sua aplicação ser adaptável em qualquer condição. Desde a década de 70, o concreto é conhecido como uma mistura simples de cimento, agregados e água, e com os avanços tecnológicos, houve uma grande evolução desse material, incorporando novas técnicas e equipamentos para estudo do concreto (ROSSIGNOLO, 2009).

Um desses avanços tecnológicos foi o surgimento do concreto com agregados leves artificiais (argila expandida). Caracterizado por ser um tipo de concreto amplamente utilizado na construção civil pelo fato de possuir baixa massa específica e altos índices de resistências mecânicas, sendo aplicado para fins estruturais, não estruturais e vedação (BOGAS et al., 2012).

Para Mehta & Monteiro (1994), a introdução de agregados leves às matrizes cimentícias possibilita a obtenção de concretos leves com peso específico de cerca de 1600 kg/m³ e resistência à compressão entre 25 e 40 MPa.

Os agregados leves são caracterizados por possuírem baixa massa específica, variando entre 80 e 900 kg/m³, em relação aos agregados naturais, como é o caso da argila expandida. Além disso, a argila expandida é caracterizada por apresentar resistência ao fogo e a ambientes agressivos, sendo objeto de pesquisas como alternativa de substituição dos agregados convencionais sem comprometer a resistência mecânica do concreto (PEREIRA, 2012).

Nos últimos tempos, a preocupação com a sustentabilidade vem fazendo com que o setor da construção civil desenvolvesse novas pesquisas destinadas a criação de fontes alternativas, o que resultou na reutilização de resíduos de borracha de pneus em concretos.

Para Fioriti et al. (2007), o emprego de resíduos de borracha de pneu proveniente de recauchutagem traz uma série de benefícios como: redução do volume de resíduo que pode causar problemas de saúde e degradação ambiental, otimização do prolongamento da vida útil dos aterros sanitários, redução do consumo de fontes naturais de agregados utilizados na produção do concreto e redução da emissão de poluentes na atmosfera pela queima desse material.

Segundo Giacobbe et al. (2008), o resíduo de pneu apresenta uma decomposição muito lenta, baixa compressibilidade, o que resulta na ocupação de grandes espaços para armazenamento. Sua queima provoca a chamada fumaça negra, que é altamente poluidora devido à diversidade de compostos liberados na combustão, o que provoca danos à saúde, e o material oleoso, derivado do petróleo, que são conduzidos para os corpos d'água, contaminando-as e tornando impróprias para consumo.

A utilização do resíduo de pneu surge como uma alternativa para o descarte de pneus inservíveis, sendo uma opção inovadora e que traria benefícios ambientais, econômicos e de desempenho ao concreto (ANGELIN E GACHET-BARBOSA, 2016).

Utilizar resíduo de borracha de pneu traz benefícios ao meio ambiente, devido à quantidade de pneus inservíveis dispostos irregularmente na natureza. De acordo com a Associação Nacional das Indústrias Pneumáticas (ANIP), cerca de 50 milhões de pneus novos são produzidos anualmente no Brasil, e somente 26,5% têm destinação ambientalmente adequada e regulamentada.

Segundo Boaventura (2011), a utilização de resíduos de pneus inservíveis vem sendo aplicado na construção civil para a produção de concreto, pavimentação asfáltica, meios-fios, entre outros, o que garante a redução da extração de recursos naturais para a produção desses artefatos.

Esta pesquisa tem como objetivo investigar a influência do aproveitamento do resíduo da borracha de pneu no comportamento físico-mecânico do concreto leve com argila expandida. Para isso, foram produzidos concretos contendo variações de argila expandida, areia e cimento, e misturas com adições de porcentagens de resíduo de borracha de pneu em substituição do agregado miúdo natural, sempre mantendo constante o fator água/cimento. As matérias primas foram caracterizadas por meio de ensaios físicos. Foram produzidos corpos de prova cilíndricos (100x200) mm de concretos submetidos aos ensaios de resistência mecânica à compressão axial e resistência mecânica à tração por compressão diametral, absorção de água e massa específica aparente após cura de 28 dias.

2 JUSTIFICATIVA

Atualmente, o setor da construção civil tem demandado mudanças tecnológicas com o objetivo de aumentar a produtividade, durabilidade e qualidade das edificações com o uso de materiais alternativos.

Segundo Scobar (2016), o concreto leve de argila expandida é uma alternativa de uso de materiais não convencionais que apresenta como vantagens o alívio gerado nas estruturas, utilização em lajes e paredes estruturais, melhor conforto termo-acústico, além de eficiência nos sistemas pré-fabricados, como produção de peças leves e em maiores dimensões, redução no custo do transporte e tempo de montagem da mesma.

A opção por utilizar o resíduo de pneu proveniente da recauchutagem, justifica pelo fato de seu impacto ambiental, visto que é um material sólido intratável, tendo uma decomposição muito lenta, com um potencial de risco de incêndio, desencadeando efeitos nocivos à saúde e ao meio ambiente, além do fato de existir uma grande quantidade de pneus que são acumulados em aterros e o Brasil não possuir usinas recicladoras suficientes para sua reciclagem.

Existem várias pesquisas onde é estudada a aplicação do resíduo de pneu na composição do concreto convencional para uso em lajes (Trigo, 2008), pavimentação intertravada com blocos de concreto e meios-fios (Fioriti et al., 2007). Essas aplicações surgem como uma alternativa para reduzir os impactos negativos causados pelo resíduo do pneu no meio ambiente, como também visa sua disposição final.

Com essas considerações, a aplicação do resíduo proveniente da recauchutagem de pneus na composição do concreto leve, pode apresentar algumas vantagens, como:

- Redução do volume de resíduos de pneu ao meio ambiente, que também pode ser causador de poluentes tóxicos na atmosfera, devido a sua queima;
- Redução do consumo e custo de agregados miúdos naturais utilizados na produção do concreto;
- Melhoria em certas propriedades do concreto, como: ductilidade, resistência a impactos e isolamento térmico e acústico.

O resíduo de pneu proveniente da recauchutagem é um material promissor, tendo algumas aplicações na indústria da construção civil devido a baixa densidade, elasticidade, capacidade de absorver energia e por apresentar bom isolamento térmico e acústico (PCZIECZEK, 2017).

Segundo Boaventura (2011), mesmo que a resistência dos concretos diminua com a incorporação do resíduo de borracha de pneu, em substituição do agregado miúdo natural, o mesmo apresenta potencial de aplicação em certas áreas da construção civil com fim não estrutural, como peças de vedação, pré-moldados, entre outros.

Desta forma, a proposta deste trabalho visa contribuir para redução de custos com aquisição de agregados naturais, substituindo por argila expandida e resíduo de borracha de pneu, transformando-os em mais uma fonte alternativa de matéria-prima empregada na construção civil para a produção de concretos leves com melhores características.

3 OBJETIVO

Esta pesquisa tem como objetivo de estudo investigar a influência do resíduo de borracha de pneu, em substituição parcial ao agregado miúdo natural, no comportamento físico-mecânico do concreto leve com argila expandida.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar os materiais (cimento, areia, argila expandida e resíduo de borracha de pneu) de acordo com as devidas normas técnicas;
- Dosar os materiais de acordo com a metodologia da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland);
- Produzir concretos leves com argila expandida e resíduo de borracha de pneu;
- Verificar a trabalhabilidade dos concretos produzidos com a adição de resíduos de borracha de pneu;

4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente pesquisa está dividida em 9 capítulos. O primeiro aborda a temática em questão, o concreto com agregados leves de argila expandida, explicando quais propriedades são modificadas pela substituição dos agregados tradicionais por agregados leves. Este capítulo também aborda o emprego do resíduo de borracha, proveniente do processo de recauchutagem do pneu, em concreto, dando ênfase aos benefícios da sua utilização para o meio ambiente.

O segundo capítulo fala dos motivos pela escolha e uso do resíduo de borracha para o concreto, trazendo vantagens e contribuições deste material.

O terceiro capítulo traz os objetivos propostos para se chegar a finalidade desta pesquisa.

No quinto capítulo são apresentados dados históricos sobre o concreto leve na construção civil, classificação, processo de fabricação, produção e propriedades. Fala também sobre o resíduo de borracha de pneu: história, impactos ambientais, reciclagem, propriedades do concreto com resíduo de borracha de pneu e aplicação na construção civil.

O sexto capítulo apresenta a metodologia aplicada nesta pesquisa, mostrando as etapas para chegar aos objetivos propostos.

O capítulo seguinte apresenta os procedimentos experimentais utilizados na pesquisa: dos materiais, método de dosagem, produção dos corpos de prova e propriedades avaliadas.

O oitavo capítulo apresenta os resultados obtidos na etapa de procedimento experimentais.

No ultimo capítulo mostra as conclusões desta pesquisa e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.1 CONCRETO LEVE

Para Rossignolo (2003), os concretos leves são diferenciados dos concretos tradicionais devido à substituição total ou parcial de agregados tradicionais por agregados leves, favorecendo a redução da massa específica, alterações em propriedades térmicas e mudanças significativas em outras propriedades do concreto, como na trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, retração, fluência, além da redução da espessura da zona de transição entre agregado e matriz do cimento.

Segundo Pereira (2012), o concreto leve é o material produzido com agregados leves, cujo seu peso específico é cerca de dois terços do peso específico do concreto moldado com agregados convencionais. O concreto leve é caracterizado por apresentar uma massa específica cerca de 1600 kg/m^3 (METHA & MONTEIRO, 1994). O Quadro 1 apresenta os valores de massa específica dos concretos leves baseado em diferentes referências.

Quadro 1 - Valores de massa específica dos concretos leves

Referência	Massa específica (kg/m^3)
RILEM (1975)	$\rho < 2000$
CEB-FIP (1977)	$\rho < 2000$
NS 3473 E (1992)	$1200 < \rho < 2000$
ACI 213R-87 (1997)	$1400 < \rho < 1850$
CEN PREN 206-25 (1999)	$800 \leq \rho < 2000$

Fonte: PEREIRA (2012)

5.1.1 Desenvolvimento Histórico do Concreto Leve

Vieira (2000), afirma que por volta de 1100 a.C. povos pré-colombianos já utilizavam concretos leves em construções estruturais. Esse tipo de concreto leve era formado por pedras pomes e um ligante formado por cinzas vulcânicas.

Os romanos também utilizavam os concretos leves a partir de um ligante à base de cal e rochas vulcânicas, com a intenção de reduzir as cargas estruturais. As obras mais conhecidas de concreto com agregado leve foi o Coliseu de Roma (Figura 1) construído entre 75 e 80 a.C, utilizando concreto leve nas estruturas de fundação e em diversas paredes, e o Panteão (Figura 2), reconstruído por volta de 110 e 125 d.C., depois de ter sido destruído por um incêndio, onde foi utilizado

concreto leve na construção da cúpula de 44 m de diâmetro, onde o qual se encontra até hoje em bom estado de conservação (ROSSIGNOLO, 2009).

Figura 1 - Coliseu de Roma



Fonte: VASCONCELOS (2011)

Figura 2 - Panteão



Fonte: LACUZIO (2015)

Utilizou-se, também, concreto leve em construções de embarcações, sendo a mais conhecida o navio norte-americano USS Selma (Figura 3), no qual foi utilizado concreto leve de xisto expandido. Construído em 1919, possuía resistência à compressão de 35 MPa, apresentando um desempenho satisfatório de durabilidade (SCOBAR, 2016).

Figura 3 - Embarcação USS Selma



Fonte: CONCRETO & CONSTRUÇÕES (2006)

Após a Segunda Guerra, começaram diversos estudos da aplicação do concreto leve na execução de estruturas de edifício, pontes e construções pré-fabricadas (ANGELIN, 2014).

A primeira aplicação de concreto leve estrutural com agregados leves artificiais foi em 1922, no ginásio da Westport High School, cidade de Kansas. Foi utilizado concreto leve na estrutura da fundação, fazendo com que proporcionasse uma redução no custo geral da edificação (ROSSIGNOLO, 2009).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), em 1930 foi utilizado concreto leve na construção da pista superior da ponte da baía de São Francisco-Oakland (Figura 4), o que contribuiu na redução de 3 milhões de dólares em aço.

Angelin (2014) afirma que, a partir da década de 50 começaram a construção de edifícios utilizando o concreto leve, como Austrália Square em 1967 (Figura 5).

Figura 4 - Ponte São Francisco-Oakland



Fonte: PRANDI (2016)

Figura 5 - Austrália Square



Fonte: BUILDING PROFILE (2019)

A produção de concreto leve no Brasil teve início na década de 70, com a implantação de uma unidade de produção de agregados leves (argila Expandida) pelo grupo CINEXPAN S.A., com a finalidade de produzir elementos pré-fabricados leves (ROSSIGNOLO, 2009).

5.2 AGREGADO LEVE

Moraiva (2007) define o agregado como um material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para o uso em concretos e argamassas. O mesmo autor classifica os agregados quanto à massa unitária, como leves, normais e pesados, como mostra o Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação dos agregados segundo a massa unitária

Classificação	Massa Unitária (kg/dm ³)	Exemplos	Aplicações
Leves	$y < 1$	Escória de alto forno, argila expandida, vermiculita.	Lajes de pontes, peças pré-moldadas, concretos para isolamento térmico e acústico.
Normais	$1 \leq y \leq 2$	Areia, brita e pedregulho.	Obras em geral.
Pesados	$y > 2$	Barita, linolita, Magnestita.	Concretos estruturais para blindagem contra radiações.

Fonte: MEHTA & MONTEIRO (1994)

Segundo Mehta e Monteiro (1994), as propriedades dos agregados leves influenciam nas propriedades do concreto, no estado fresco e endurecido, principalmente na resistência, o que está relacionada com a quantidade de água necessária para se obter uma boa trabalhabilidade.

5.2.1 Classificação do agregado leve

Os agregados leves são classificados em naturais e artificiais. Os agregados leves naturais são obtidos por meio da extração em jazidas e pela classificação granulométrica. São agregados que tem pouca utilização em concretos estruturais devido a sua variabilidade de suas propriedades e localização das jazidas. Como exemplo de agregado leve natural, tem-se a pedra pomes e as escórias vulcânicas (ROSSIGNOLO, 2009).

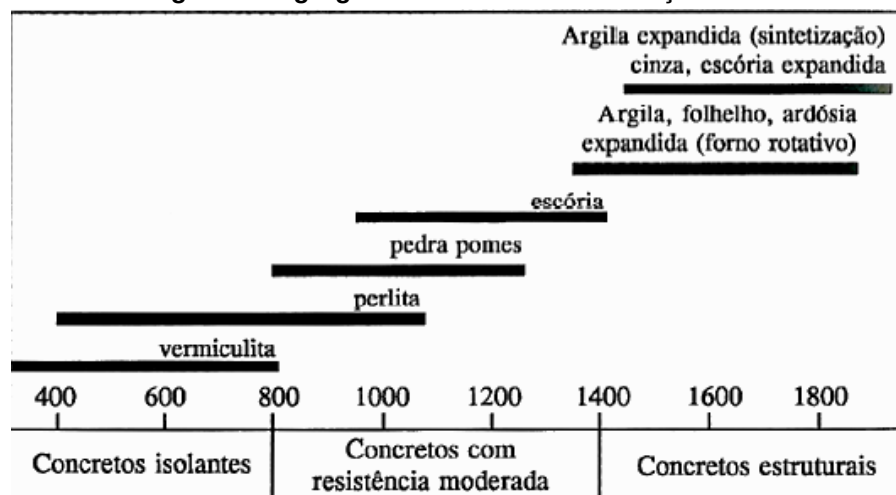
Os agregados artificiais são obtidos por tratamento térmico de uma variedade de materiais e são classificados com base na matéria prima utilizada e no processo de fabricação. Dentre os agregados artificiais, temos os resultantes da aplicação de calor para a expansão de argilas, poliestireno, ardósias, folhelhos, perlitas e vermiculitas [...]. (MORAVIA, 2007, p. 13).

A ACI 213R (2003), caracteriza os agregados leves em três grupos, de acordo com sua massa específica e utilização na construção civil:

- Agregados para concretos isolantes: resultam em concretos com massa específica em torno de 300 kg/m³ e 800 kg/m³ e resistência desprezível;
- Agregados para concretos com resistência moderada: concretos com resistência à compressão em torno de 7 e 17 MPa, sem função estrutural e isolamento intermediário;
- Agregados para concretos estruturais: Resulta em concretos com maior resistência à compressão e são empregados para fins estruturais.

A Figura 6 apresenta alguns exemplos de agregados leves com suas devidas utilizações.

Figura 6 - Agregados leves e suas utilizações



Fonte: PEREIRA (2012)

5.2.2 Processo de fabricação do agregado leve

De acordo com Gomes Neto (1998), existem dois processos de fabricação do agregado leve artificial, a sinterização e o forno rotativo.

5.2.2.1 Sinterização

No processo de sinterização, a matéria-prima é umedecida e misturada com combustível (carvão moído ou coque), para em seguida ser transportada por uma grelha móvel sob a ação de queimadores, sendo submetido a altas temperaturas e consequente expansão, devido à formação de gases (GOMES NETO, 1998).

O produto final obtido por esse processo é um clínquer irregular e com arestas vivas, possuindo massa específica entre 650 kg/m^3 e 900 kg/m^3 (ROSSIGNOLO, 2009).

Para Santos (1986), no processo de sinterização o agregado apresenta poros abertos, sem recobrimento e com altos valores de absorção de água, sendo uma desvantagem para o concreto.

Rossignolo (2003) cita que os agregados produzidos por esse processo faz com que haja penetração da pasta de cimento nos poros externos do agregado, fazendo com que aumente o consumo de cimento e a massa específica do concreto.

5.2.2.2 Forno rotativo

No processo de forno rotativo (Figura 7), também denominado nodulação, aproveita as características expansivas de determinados materiais, como algumas argilas, e a matéria-prima é submetida a temperaturas entre 1000°C e 1350°C (PEREIRA, 2012). Parte do material se funde e forma uma massa viscosa, outra parte se decompõe quimicamente, liberando gases, fazendo-o expandir, mantendo uma estrutura porosa mesmo depois do resfriamento (MORAVIA, 2006).

Esse processo realizado em fornos rotativos a gás ou a óleo diesel é semelhante ao processo de obtenção do cimento Portland (PEREIRA, 2012).

Figura 7 - Forno rotativo para produção de argila expandida



Fonte: CINEXPAN (2019)

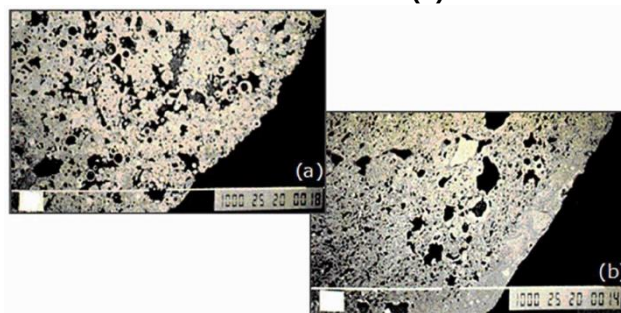
O processo de produção por meio do método do forno rotativo pode ser dividido nas seguintes etapas:

- 1. Homogeneização:** a matéria prima é lançada em um depósito para homogeneização;
- 2. Desintegração:** os torrões de argila são reduzidos a um diâmetro máximo de cinco centímetros;
- 3. Mistura e nova homogeneização:** tem a finalidade de deixar a argila com a trabalhabilidade adequada. É adicionado água e aditivos para melhorar a plasticidade e aumentar a sua expansão;
- 4. Laminação:** a mistura passa por dois cilindros que eliminam os torrões maiores que cinco milímetros;
- 5. Pelotização:** o material é forçado contra uma placa perfurada com orifícios circulares, e são cortados por uma lâmina rotativa;
- 6. Secagem e queima:** considerada a parte mais importante do processo, ocorre no forno rotativo. Na primeira fase, ocorre a secagem das esferas de argila. Na zona de combustão, o forno atinge a temperatura prevista para expansão das esferas, geralmente entre 1000°C e 1350°C.
- 7. Resfriamento:** geralmente é utilizado um cilindro, na saída do forno, no qual é soprado ar por ventiladores. O ar quente é reaproveitado no interior do forno;
- 8. Classificação e estocagem final:** os agregados leves são classificados em peneiras vibratórias e armazenados para comercialização (ROSSIGNOLO, 2009).

Os agregados leves, produzidos por meio do forno rotativo, apresentam características como: forma esférica, que pode lhe garantir maior facilidade de segregação, variação granulométrica, formato arredondado regular, casca cerâmica vitrificada, resistente, baixa permeabilidade e baixa porosidade (ROSSIGNOLO, 2009).

A graduação desse agregado leve é da ordem 4,8/25 mm, com 80% do material com granulometria entre 19 e 25 mm (PEREIRA, 2012). A Figura 8 mostra a diferença da estrutura interna do agregado leve produzidos pelos processos de sinterização e forno rotativo, respectivamente.

Figura 8 - Micrografia (MEV) dos agregados produzidos pelos processos de sinterização (a) e forno rotativo (b)



Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

5.3 ARGILA EXPANDIDA

A argila expandida é um agregado leve artificial, produzido por aquecimento de argilas a temperatura em torno de 1100°C a 1200°C. Nesta temperatura, parte dos constituintes desse material se funde, formando uma massa viscosa, enquanto que a outra parte se decompõe quimicamente, liberando gases que são incorporados a massa sinterizada, expandindo-a em até sete vezes o seu volume inicial (SHORT e KINNIBURGH, 1963).

Para Scobar (2016), a argila expandida é utilizada em paisagismo, isolamento térmico e jardinagem. Além disso, o processo de produção não interfere nas características, mas a absorção de água pelo agregado influencia na produção do concreto estrutural.

O Brasil produz unicamente a argila expandida, pela Cinexpan Indústria e Comércio Ltda, em São Paulo. De acordo com a CINEXPAN, Cerca de 60% da produção da argila expandida é destinada ao setor da construção civil nacional.

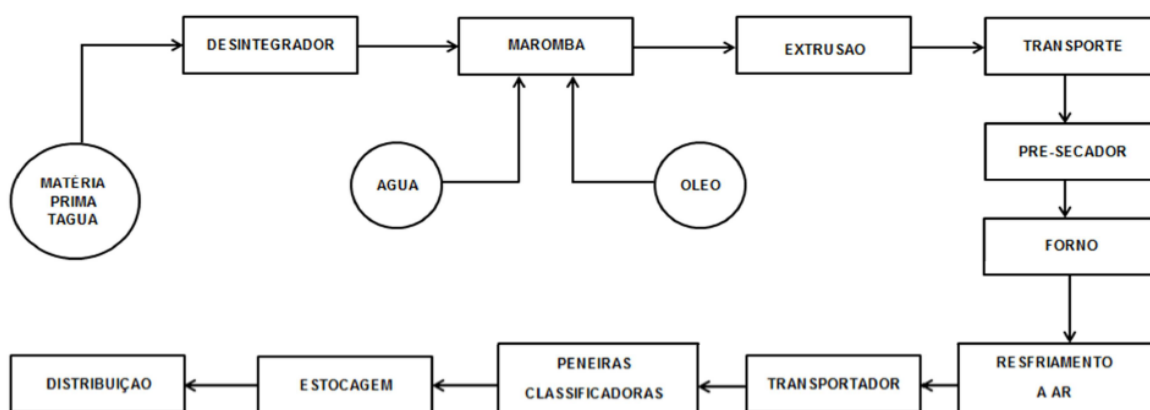
5.4 USINA DA CINASITA

A argila expandida é produzida por um único fabricante, a antiga CINASA (agora chamada de CINEXPAN), localizada na cidade de Várzea Paulista, a 50 km de São Paulo, tendo a produção voltada para a indústria têxtil, e com o avanço em pesquisas em diversas universidades para o desenvolvimento de novas tecnologias de concreto, a demanda por argila expandida no mercado da construção civil tem aumentado nos últimos anos (PEREIRA, 2012).

A antiga CINASA foi construída em 1964, fornecendo o agregado de argila expandida, ainda inexistente no Brasil, para a construção de conjuntos habitacionais. No início, os engenheiros da CINASA trabalharam em parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e a empresa norte americana Fuller, que iniciaram as pesquisas de materiais, determinação das diretrizes do projeto e a operação da usina, tendo como testes a produção efetiva em janeiro de 1968 com a produção de 7500 m³ de produto mensais (CABRAL, 2005).

Devido às necessidades da indústria da construção civil em São Paulo, foram realizadas pesquisas para encontrar argilas tecnicamente viáveis para a produção dos agregados leves pelo processo de forno rotativo. Dentre os trezentos tipos de argilas encontradas em São Paulo, apenas uma foi escolhida, devido a condições econômicas para a industrialização (PEREIRA, 2012). Na época, a produção era realizada por meio do forno rotativo, seguindo o fluxograma (Figura 9) a seguir:

Figura 9 - Processo de produção da argila expandida por forno rotativo

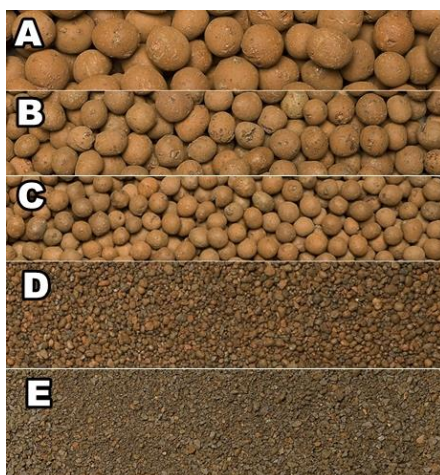


Fonte: PEREIRA (2012)

O mesmo autor afirma que naquele ano a argila, que é a matéria prima para a produção da argila expandida, era retirada no estado da Bahia, produzindo dois tipos de argila expandida (a 2215, que equivale a 15 e 22 mm e a 1506, com dimensões entre 6 e 15 mm).

Nos dias atuais, a empresa produz cinco diferentes tamanhos de argilas expandidas: a 3222 (22 a 32mm) e a 2215 (15 a 22mm) usadas em paisagismo, a 1506 (6 a 15mm), a 0500 (0 a 5mm) usadas em concreto leve e tipo laminado (0 a 2,5mm) usado na fabricação de churrasqueira, lareiras e refratários, como mostra a Figura 10 (CINEXPAN, 2019).

Figura 10 - Argilas expandidas: A) 3222; B) 2215; C) 1506; D) 0500 e E) 2,5



Fonte: CINEXPAN (2019)

5.5 PRODUÇÃO DO CONCRETO LEVE

O processo de produção do concreto leve divide-se em mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura, que são explicados a seguir.

5.5.1 Mistura

Rossignolo (2003), alerta sobre cuidados a serem tomados antes do início da mistura dos materiais na produção do concreto leve, devido aos agregados leves absorverem água, para evitar que isso prejudique algumas propriedades do concreto, principalmente no estado fresco.

Agregados leves que possuem baixa absorção de água, abaixo de 10%, em 24 horas de imersão, pode utilizar o método de mistura dos concretos tradicionais e usar o agregado leve em condições ambientais, sem saturação prévia. Mesmo com índice de absorção abaixo de 10%, alguns agregados leves apresentam alta absorção de água nos primeiros minutos, e em seguida, se estabilizando. Devido a essa ocorrência, é preferível adicionar os materiais sólidos e a água no misturador, para que, em seguida, sejam colocados os agregados leves (ANGELIN, 2014).

Contudo, agregados leves com índice de absorção maiores que 10% em 24 horas de imersão, é recomendado a saturação prévia antes da mistura, pois haverá dificuldade em manter a trabalhabilidade adequada do concreto durante o lançamento (ROSSIGNOLO, 2003).

5.5.2 Transporte, Lançamento e Adensamento

Rossignolo (2009), explica que no processo de transporte dos concretos leves, existe a tendência à segregação, devido a baixa massa específica dos agregados. Esse fenômeno pode ser reduzido com a dosagem de concretos com coesão e consistência adequados, controlando a relação água/cimento, teor dos agregados miúdos e com o uso de adições minerais, como por exemplo, a sílica ativa.

Para o lançamento ou bombeamento do concreto leve, Angelin (2018) cita que a umidade e a granulometria dos agregados leves são importantes. Para a autora, a pré-saturação dos agregados é importante para prevenir a perda brusca de trabalhabilidade no estado fresco, o que pode provocar o entupimento dos dutos durante o lançamento.

Em relação ao adensamento, devido aos concretos leves possuírem menores valores de massa específica, os esforços transmitidos às formas, durante o lançamento, são inferiores em relação aos concretos convencionais (ROSSIGNOLO, 2009).

Para evitar a formação de vazios durante o adensamento, Holm e Bremner (2000) indicam a utilização de vibradores, usados em concretos convencionais, de baixa frequência.

5.5.3 Cura

Segundo a norma ACI 211.2 (2004), no processo de cura dos concretos leves deve-se ter um controle de temperatura, pois durante a hidratação do cimento há uma maior elevação de temperatura do que nos concretos convencionais, devido a baixa condutividade térmica dos agregados leves.

Para evitar o aparecimento de fissuras, é recomendado o adiamento da retirada das formas ou cobrir o concreto com mantas isolantes. E se for utilizada cura térmica, deve ser adotado um período maior de cura ou velocidade de elevação de temperatura menor (ANGELIN, 2018).

5.6 TRABALHABILIDADE DO CONCRETO LEVE NO ESTADO FRESCO

Segundo Scobar (2016), os valores de abatimento do tronco de cone em concretos leves são menores que o utilizado para concretos convencionais, tendo a absorção de água dos agregados grande influência na trabalhabilidade do concreto após a mistura, além da menor deformação do concreto leve pela ação da gravidade.

Na trabalhabilidade do concreto, devem ser considerados a granulometria e o fator água/cimento, visto que, quanto menor a granulometria do agregado, maior será a quantidade de água necessária para envolver os grãos com a mesma (ANGELIN, 2014).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), os altos valores de índice de consistência e baixa coesão são fatores responsáveis pela segregação e exsudação nos concretos leves, o que afeta negativamente a manipulação do material, o que pode alterar o desempenho de algumas propriedades do concreto no estado endurecido.

5.7 PROPRIEDADES DO CONCRETO LEVE NO ESTADO ENDURECIDO

5.7.1 Massa Específica

Segundo Moraiva (2007) apud ASTM C330 (1991), a massa específica do concreto leve no estado seco deve apresentar valores entre 1400 a 1800 kg/m³.

Para Rossignolo (2003), a massa específica dos concretos leves apresentam variação progressiva, que dependem das condições de exposição e, é recomendado utilizar valores de massa específica do concreto leve no estado fresco para estimativa de cargas em formas e escoramento, e para estimativa de peso próprio, considerar o valor de massa específica do concreto leve seco ao ar.

O valor da massa específica em concreto leve varia com o tempo e é maior no estado fresco e diminui com o endurecimento e a idade do concreto (VARGAS, 2018).

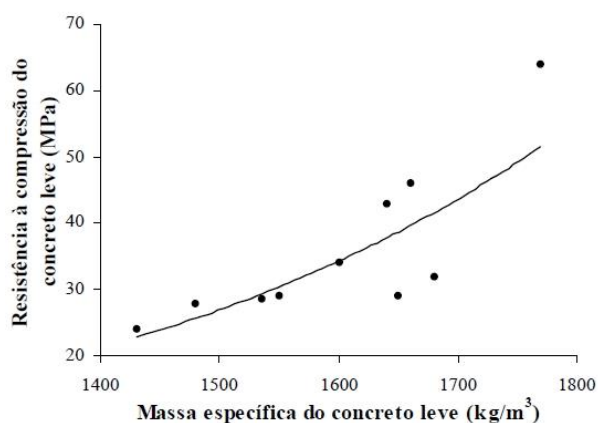
Em um estudo realizado por Silva (2003), houve a diminuição da massa específica do concreto leve em até 7% em diferentes idades, como está apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Resultado da massa específica em concreto leve

Idade (dias)	Massa específica (kg/m ³)
Fresco	1795
7	1701
28	1673
32	1664
43	1657

Fonte: SILVA (2003)

Rossignolo (2003) denomina a relação entre resistência à compressão e massa específica como fator de eficiência, sendo esse fator apresentado nos resultados de um estudo realizado por Evangelista et al. (1996), que mostra a relação entre essas duas propriedades no concreto leve com argila expandida (Figura 11). Nesse estudo, foram utilizados agregados com dimensão máxima característica de 9,5 e 12,5 mm e consumo de cimento de 500 kg/m³.

Figura 11 - Relação entre resistência à compressão e massa específica do concreto leve com argila expandida

Fonte: ROSSIGNOLO (2003) apud EVANGELISTA et al. (1996)

5.7.2 Absorção de Água

Segundo Moraiva (2007), a água pode levar agentes agressivos para dentro do concreto, ou dissolver compostos desse material por meio da permeabilidade, difusão, absorção capilar e migração, o que pode causar comprometimento do concreto.

Para Neville (1997), um concreto durável é aquele material impermeável, que dificulte a penetração de agentes agressivos e que possua índice de absorção abaixo de 10%.

Pesquisas realizadas por Angelin (2018), Angelin (2014), Scobar (2016) e Rossignolo (2003) concluíram que o uso de argila expandida aumenta o índice de absorção de água no concreto, como mostra o Quadro 4:

Quadro 4 - Resultados de absorção de água por imersão em concretos convencionais e concretos leves de diferentes autores

Autores	Absorção de água em concreto convencional (%)	Absorção de água em concreto leve com argila expandida (%)
ANGELIN (2018)	4,0	6,0
ANGELIN (2014)	4,02	9,15
SCOBAR (2016)	5,59	9,60
ROSSIGNOLO (2003)	-	6,6

Fonte: O Autor (2019)

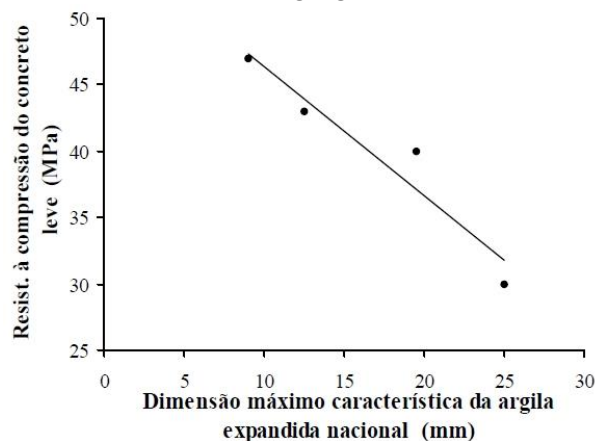
5.7.3 Resistência à Compressão Axial

Segundo Vargas (2018), as propriedades mais utilizadas para caracterizar um concreto leve são a resistência à compressão e massa específica, as quais estão relacionadas com o tipo de agregado leve e sua granulometria.

Para Rossignolo (2003), a granulometria dos agregados leves tem influência na resistência mecânica e na massa específica dos concretos leves em relação aos concretos convencionais, uma vez que a massa específica da argila expandida, por exemplo, é inversamente proporcional à sua dimensão.

A resistência do concreto leve pode ser aumentada reduzindo a dimensão máxima característica do agregado, como mostra a Figura 12 (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

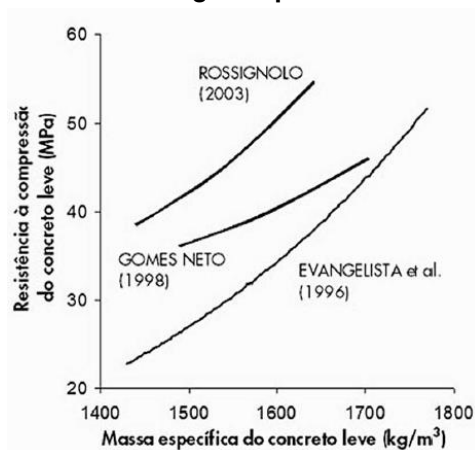
Figura 12 - Relação entre resistência à compressão do concreto leve e a dimensão máxima característica do agregado leve nacional



Fonte: EVANGELISTA et al. (1996)

A Figura 13 demonstra a viabilidade econômica da utilização da argila expandida em concretos leves com resistência à compressão abaixo de 60 MPa e valores de massa específica em torno de 1400 à 1800 kg/m³ para diferentes autores.

Figura 13 - Relação entre resistência à compressão e massa específica do concreto leve com argila expandida

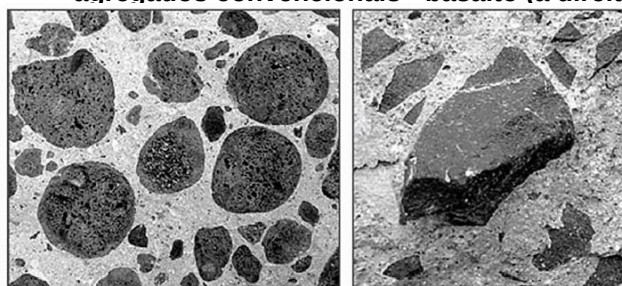


Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

Em concretos com agregados convencionais, o valor do módulo de deformação do agregado é maior que o da argamassa, o que ocasiona a ruptura do concreto, iniciada na zona de transição, resultando uma linha de fratura ao redor do agregado, sendo a fase mais resistente (ROSSIGNOLO, 2009).

Em relação aos concretos com agregados leves, a ruptura não ocorre devido a diferença entre deformações dos agregados e da pasta de cimento, mas sim pelo colapso da argamassa e a linha de fratura que atravessa o agregado, como está exemplificado na Figura 14 (ANGELIN, 2014).

Figura 14 - Forma de ruptura dos concretos com agregados leves (à esquerda) e com agregados convencionais - basalto (à direita)



Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

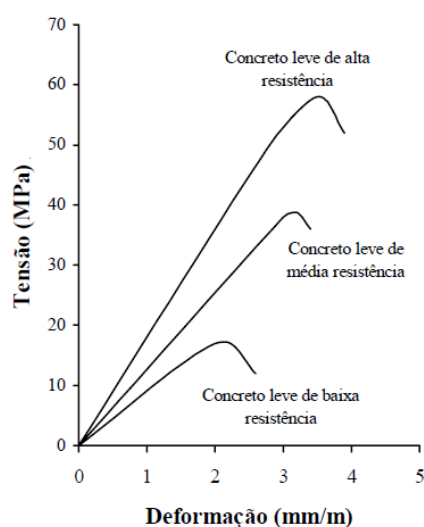
Em concretos leves, a resistência à compressão apresenta estabilidade dos seus valores finais mais rapidamente em relação aos concretos tradicionais, onde aos 7 dias, os concretos leves já apresentam 80% da resistência à compressão observada aos 28 dias de idade (ROSSIGNOLO, 2003 apud EUROLIGHTCON, 1998).

5.7.4 Comportamento da Curva Tensão-Deformação

Na curva tensão-deformação (Figura 15), observada por Rossignolo (2003), em concretos leves apresentam maior linearidade do trecho ascendente, maior valor da deformação última e maior inclinação no trecho descendente da curva após a ruptura, comparando com o concreto tradicional.

O mesmo autor atribui estas características devido à maior compatibilidade entre os valores do módulo de deformação da matriz de cimento e do agregado.

Figura 15 - Comportamento da curva tensão-deformação dos concretos leves



Fonte: ROSSIGNOLO (2003) apud CARASQUILLO et al. (1981)

Em análise ao gráfico da Figura 15, observa-se que parte ascendente da curva tensão-deformação dos concretos leves torna-se mais linear à medida que a resistência do concreto cresce, e a parte descendente da curva torna-se mais íngreme.

O mesmo autor descreve em seu estudo que a curva tensão-deformação torna-se mais linear em concretos com sílica ativa, o que provavelmente pode ser devido à melhoria de desempenho da zona entre agregado e a matriz de cimento. Além disso, os autores confirmam que a substituição de areia natural pelo agregado leve miúdo não influi no comportamento da curva tensão-deformação.

5.7.5 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Segundo Holm e Bremner (1994), os valores de resistência à tração na compressão diametral e tração na flexão em concretos leves são inferiores em

relação aos concretos com massa específica normal, para o mesmo nível de resistência à compressão, devido ao grande volume de vazios dos agregados leves (argila expandida), que pode chegar a 50% do volume total.

Para Rossignolo (2003), concretos leves com resistência à compressão maior que 20 MPa, os valores de resistência à tração por compressão diametral varia entre 5 e 15%. O teor de umidade no concreto leve pode ser maior do que no concreto tradicional, com as mesmas condições de cura, e que pode causar uma redução significativa no valor da resistência à tração. Além disso, em concretos leves a resistência à tração na flexão é mais afetada do que a resistência à compressão diametral.

5.8 RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU

Segundo Vasconcelos (2009), a borracha é um produto originário do látex, presente nas seringueiras, e que ao final de um processo de industrialização, origina diversos produtos, como o pneu de borracha.

5.8.1 História da Borracha de Pneu

Em 1830, o americano Charles Goodyear descobriu em um de seus experimentos que quando a borracha era exposta a altas temperaturas, apresentava sério risco de se dissolver. Porém, se a borracha fosse cozida junto com enxofre, mantinha suas condições de elasticidade no frio ou calor. Charles havia descoberto o processo de vulcanização da borracha (ANIP, 2018).

Segundo Ruffo (2009), os primeiros automóveis possuíam aros metálicos com madeira, o mesmo sistema que as carruagens utilizavam. Após a descoberta do processo de vulcanização por Charles, esses aros começaram a serem vestidos com borrachas vulcanizadas.

Em 1845, os irmãos Michelin foram os primeiros a patentear o pneu para automóvel, e em 1847 o inglês Robert Thompson colocou uma câmara cheia de ar dentro dos pneus de borracha maciça e patenteou, assim, o pneu pneumático (ANIP, 2018).

Em 1888, John Boyd Dunlop reinventou o pneu com uma câmara de ar de borracha flexível, tendo obtido da rainha Vitória a patente de número 10607 pela invenção do pneu (MÖDERLER, 2012).

O início da produção de pneus no Brasil ocorreu a partir da implantação do Plano Geral de Viação Nacional, em 1936, com a instalação da Companhia Brasileira de Artefatos de Borracha, no Rio de Janeiro, que fabricou mais de 29 mil pneus no seu primeiro ano de funcionamento (ANIP, 2018).

5.8.2 Composição dos Pneus

Para Lagarinhos (2011), os pneus de automóveis e pneus de carga são formados pelos mesmos materiais, porém com porcentagem de borracha natural e sintética diferente um do outro, como apresenta o Quadro 5.

Quadro 5 - Materiais componentes do pneu

Materiais	Pneu de automóvel (%)	Pneu de carga (%)
Borracha natural	14	27
Borracha sintética	27	14
Negro de fumo	28	28
Aço	14-15	14-15
Tecido, aceleradores, antiozônio, óleos, etc.	16-17	16-17
Peso total	Peso médio do pneu novo 8,5 kg. No Brasil, o pneu inservível pesa 5 kg, conforme a instrução normativa nº8 do IBAMA, de 15 de maio de 2002.	No Brasil o pneu inservível pesa 40 kg, conforme a instrução normativa nº 8 do IBAMA, de 15 de maio de 2002.

Fonte: LAGARINHOS (2011)

Segundo Filho (2007), a estrutura do pneu (Figura 16) é formada pela carcaça, flancos, talão e a banda de rolamento, descritos a seguir:

1 – Carcaça: É a estrutura interna do pneu, com função de reter o ar sob pressão e suportar o peso do veículo. A carcaça é constituída por lonas de nylon, aço ou poliéster, dispostas diagonalmente nos pneus convencionais e radialmente nos pneus radiais, formando a parte resistente do pneu.

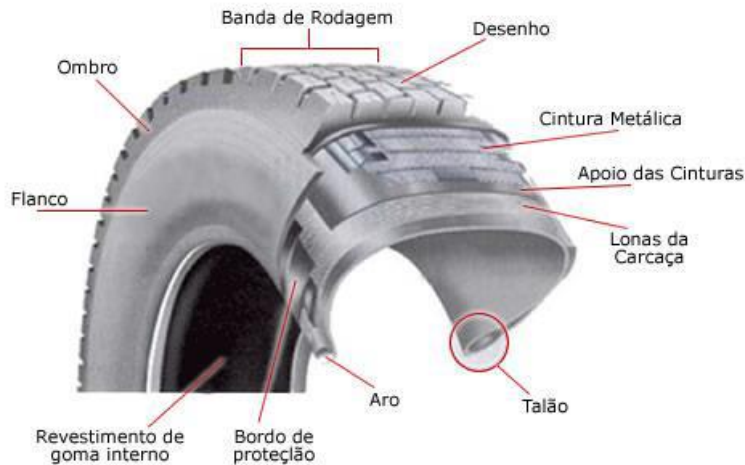
2 – Flancos: São constituídos de um composto de borracha de alto grau de flexibilidade, dispostos lateralmente, com o objetivo de proteger a carcaça contra os agentes externos.

3 – Talões: São constituídos internamente por arames de aço de grande resistência, unidos e recobertos por borracha. Sua finalidade é manter o pneu firmemente acoplado ao aro, impedindo-o de ter movimentos independentes.

4 – Banda de rodagem: É a parte do pneu que entra diretamente em contato com o solo. Oferece grande resistência ao desgaste devido à sua composição de borracha e agentes químicos especiais. Seus

desenhos visam proporcionar boa tração, estabilidade e segurança ao veículo (KAMIMURA, 2002).

Figura 16 - Estrutura do pneu



Fonte: ANGELIN (2014)

A borracha da banda de rodagem ainda inclui em sua composição: 83% de carbono, 7% de hidrogênio, 2,5% de oxigênio, 0,3% de enxofre e 6% de cinzas (FILHO, 2007). O mesmo autor ainda afirma que 40% do peso do pneu corresponde à adição de borracha natural e sintética, que garantem propriedades elásticas e estabilidade térmica, respectivamente.

O negro fumo também faz parte da composição da borracha de pneu, que traz como vantagem o aumento da resistência mecânica, porém sua adição dificulta a reciclagem de pneus usados (FILHO, 2007). O Quadro 6 exemplifica os componentes da borracha de pneu e suas finalidades.

Quadro 6 - Composição de borracha de pneu, porcentagem e finalidades

Componente	Porcentagem	Composição/Finalidade
SBR	62,1	$[-CH_2-CH=CH-CH_2- \text{ran} - CH_2-CH(Ph) -]$
Negro de fumo	31	Fortificar a borracha; aumentar a Resistência à abrasão; dissipar o calor.
Óleo modificado	1,9	Mistura de hidrocarbonetos aromáticos/amolecer a borracha, dar trabalhabilidade.
Óxido de zinco	1,9	Controlar o processo de vulcanização; melhorar as propriedades físicas da borracha.
Ácido esteárico	1,2	Controlar o processo de vulcanização; melhorar as propriedades físicas da borracha.
Enxofre	1,1	Promover a ligação transversal entre as cadeias poliméricas; prevenir deformações excessivas a altas temperaturas.
Aceleradores	0,7	Composto organo-enxofre para catalisar a vulcanização.

Fonte: FILHO (2007)

5.8.3 Impactos Oriundos Pela Disposição Irregular de Pneus

O grande acúmulo de pneus inservíveis em locais inadequados (Figura 17), devido ao aumento na frota de veículos nas cidades, vem tornando um grande problema de gestão de resíduos. Kanso (2014) cita que, depositando o resíduo no solo não está apenas adiando a resolução de um problema, e sim contribuindo para um problema ainda maior no futuro.

Figura 17 - Acúmulo de pneus inservíveis



Fonte: MARTINS (2005)

Segundo Ribeiro (2005), a disposição final incorreta dos pneus inservíveis gera passivo ambiental com sérios riscos ao meio ambiente e à saúde pública, gerando locais propícios para proliferação de doenças, contaminação de mananciais, por lixiviação dos metais presentes na composição dos pneus, além da contaminação do ar, devido à possível queima a céu aberto, consequentemente liberação do óleo pirólico, poluentes gasosos tóxicos, fuligem escura e forte odor de enxofre.

Quando os pneus são dispostos sem nenhum tipo de preocupação ambiental, atuam de forma favorável na proliferação de vetores transmissores de doenças como dengue, leptospirose, entre outros, devido aos pneus promoverem um ambiente com temperatura e condições adequadas para reprodução de mosquitos, ratos e outros (BOAVENTURA, 2011).

A destinação ambientalmente adequada de pneus inservíveis requer procedimentos técnicos, onde os pneus são descaracterizados de sua forma inicial e seus elementos constituintes são reaproveitados, reciclados ou processados por outras técnicas admitidas pelos órgãos competentes (CONAMA, 2009).

5.8.4 Reciclagem de Pneus Inservíveis

Segundo a resolução do CONAMA nº 416/2009, pneu inservível é definido como aqueles que sofreram danos irreparáveis em sua estrutura, não servindo mais para a circulação ou reforma. A mesma resolução cita que para cada novo pneu comercializado, as empresas fabricantes são obrigadas a dar uma destinação adequada a um pneu inservível, sendo descaracterizados e tendo seus elementos constituintes reaproveitados, reciclados ou processados por técnicas admitidas por órgãos ambientais.

Para Filho (2007), a reciclagem é a conversão de um produto descartável em uma matéria-prima que sirva para a confecção de outros produtos, o que garante ser ecologicamente correta e lucrativa, tanto para os recicladores quanto para as indústrias que as transformam.

5.8.5 Formas de Reciclagem

A escolha da forma de reciclagem vai depender de alguns fatores, como: aspectos técnicos e econômicos ligados à natureza, volume e localização dos resíduos, e outros (FILHO, 2007).

5.8.5.1 Pirólise

Salini (2000) descreve o processo de pirólise a seguir:

A pirólise implica no aquecimento dos pneus a uma temperatura superior a 1000° C [...] Sob temperatura e pressão apropriadas a fração de óleo existente e algumas associações orgânicas são liberadas na forma líquida enquanto outras frações são liberadas na forma de gases voláteis.

Esses gases podem ser recuperados e queimados para produzir vapor ou combustível de motores. A fração líquida pode ser utilizada como combustível, extraíndo-se então frações leves e pesadas. A parte remanescente do pneu é basicamente um esqueleto de carbono, que pode ser prensado para formar blocos ou granulado (SALINI, 2000).

É um processo de destinação final de resíduos eficiente pelo fato de ser energeticamente autossustentável. Porém, devido ao alto custo de manutenção, as empresas não tem interesse por esse processo de baixo custo econômico (FILHO, 2007).

5.8.5.2 Queima de pneus

A incineração dos pneus (Figura 18) é um processo de reciclagem mais simples que pode fornecer energia por volta de 8000 kcal/kg, sendo uma energia igual ou maior a fornecida na queima de carvão. Para tal processo, é imprescindível a construção de incineradores em locais que não representem risco ao meio ambiente, ou seja, locais que não seja a céu aberto, devido à queima liberar dióxido de enxofre na atmosfera, poluindo o ar e contaminar o lençol freático pelo óleo produzido pela queima. A queima dos pneus é utilizada para a fabricação de pneus, e em lugares como a Inglaterra é usado em usinas termelétricas (SANTOS, 2005).

Figura 18 - Queima de pneus inservíveis



Fonte: MARTINS (2005)

O co-processamento do pneu, resultante da queima a 1700°C e transformando-o em cinzas, em fornos de clínquer são incorporados ao cimento em concentrações que são consideradas aceitáveis e é uma forma segura para a sua disposição final, e que contribui para a diminuição do consumo de combustíveis não renováveis (carvão e óleo). Este co-processamento é usado em fábricas de cimento nos Estados Unidos, Europa e Japão e que comprovaram que esta prática não prejudica a qualidade do clínquer e cimento (SOUZA, 2000).

5.8.5.3 Trituração

Segundo Angelin (2018) apud Reschner (2008), este processo pode ser feito a temperatura ambiente ou por meio do processo criogênico, a temperaturas abaixo de -120 °C.

Pelo processo em temperatura ambiente, os pneus passam por um moinho que contém várias facas, onde estes são transformados em lascas de 50 mm e posteriormente para o triturador e reduzidas a lascas de 10 mm. Nesta etapa do

tritador, parte do aço é removido, e em seguida o restante do aço é retirado magneticamente. Várias empresas fazem triturações consecutivas para se reduzir ainda mais o tamanho dos resíduos (SILVA, 2015).

5.8.5.4 Recauchutagem

Neste processo, a parte estrutural do pneu (carcaça, flanco e talões) é aproveitada e, somente a parte da banda de rolamento é recomposta. É uma forma de reciclagem que prolonga a vida útil do pneu e economiza 80% de matéria prima para produzir novos pneus, o que diminui o volume de pneus velhos na natureza (SANTOS, 2005).

Segundo Filho (2007), pneus de ônibus e caminhões podem ser reformados até cinco vezes com um terço do preço de um pneu novo. Já pneus de aviões a jato podem passar por esse processo de recauchutagem em até 30 vezes, e pneu já reformado de automóvel não pode ser reformado mais de uma vez.

5.8.6 Utilização de Resíduos de Borracha em Concretos de Cimento Portland

A utilização do resíduo de borracha de pneu na produção de materiais a base de cimento é uma grande oportunidade de contribuir para a preservação do meio ambiente. Dessa forma, vários trabalhos visam proporcionar o enriquecimento de diferentes propriedades aos materiais de cimento Portland.

Quando se trata do critério de incorporação do resíduo de borracha de pneu em concretos verificam-se nos estudos o emprego de abordagem variadas. Alguns pesquisadores optaram por utilizar o resíduo na substituição do agregado miúdo, outros do agregado graúdo, do cimento ou ainda incorporando-o como pó ou fibras (GIACOBBE et al., 2008).

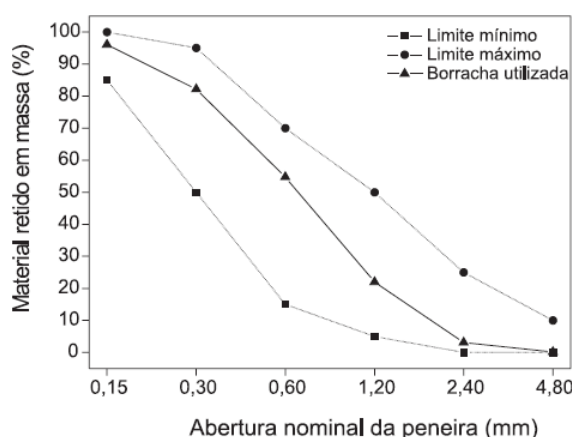
Em relação a massa unitária e massa específica dos resíduos de pneu, o Quadro 7 mostra que quando se caracteriza o resíduo por estes ensaios, há grande variação de resultados, e de acordo com Giacobbe et al. (2008) essas variações podem ser consequência da metodologia escolhida para a realização destes ensaios.

Quadro 7 - Massa unitária e Massa Específica do resíduo de borracha de pneu

Autores	Massa unitária (Kg/dm³)	Massa específica Real (Kg/dm³)
TOPÇU, 1994	0,410 – 0,472	0,650
TOUTANJI, 1995	-	0,610
HERNANDES-OLIVARES, 2002	0,840	-
NIRSCHL et al., 2004	0,270	1,350 – 1,400
AKASAKI et al., 2004	-	1,090
MENEGUINI, 2003	0,395	0,548
LINTZ; SANCHEZ; CARNIO, 2004	0,390 – 0,430	1,100 – 1,200
MARQUES; TRIGO; AKASAKI, 2004	0,348	1,090
MARQUES; NIRSCHL; AKASAKI, 2006	0,270	1,090

Fonte: BOAVENTURA (2011) apud SANTOS (2008)

De acordo com Freitas et al. (2009), os resíduos provenientes da raspagem de pneu apresenta uma granulometria (Figura 19) dentro do limite mínimo e máximo aceitável, estando dentro dos limites recomendados para uso como agregado miúdo.

Figura 19 - Curva granulométrica do resíduo de borracha de pneu

Fonte: FREITAS et al. (2009)

5.8.7 Propriedades do Concreto com Resíduo de Pneu

5.8.7.1 Aspectos de trabalhabilidade

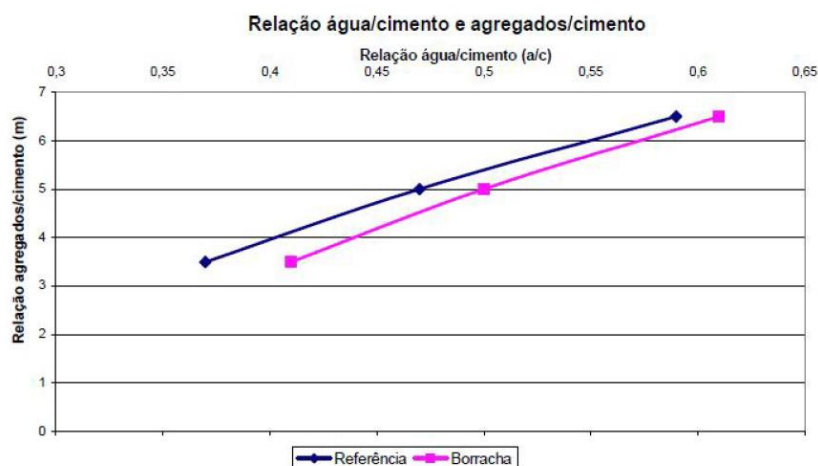
Um fator importante que deve ser considerado na produção de um concreto com borracha é a sua trabalhabilidade, que é diminuída por conta da massa específica da mistura após a incorporação da borracha.

Para Santos (2005), é esperada a diminuição da trabalhabilidade para concretos com substituição do agregado miúdo natural por resíduo de pneu, devido ao atrito interno que a borracha provoca. O mesmo autor aconselha o uso de aditivos para minimizar esse efeito.

Nirschil e Akasaki (2002) apud Marques et al. (2004), concluíram que o teor máximo de fibra de borracha para não comprometer a trabalhabilidade do concreto é de 20% do seu volume.

Segundo a pesquisa de Marques et al. (2012), para manter a trabalhabilidade do concreto, produzido com a substituição de agregado miúdo natural por resíduos de pneus, para um mesmo teor de cimento, é necessário uma maior relação água/cimento, como mostra a Figura 20.

Figura 20 - Trabalhabilidade do concreto produzido com resíduo de pneu



Fonte: MARQUES et al. (2012)

5.8.7.2 Massa específica

Boaventura (2012) explica que a massa específica do concreto é reduzida à medida que aumenta o valor de substituição de agregado miúdo natural por resíduo de borracha. Essa redução é consequência da dificuldade de adensamento, ou seja, concretos com resíduos de borracha mal adensados podem apresentar vazios internos que fazem diminuir a massa específica (NIVELLE, 1997).

Para Mehta e Monteiro (1994), quanto menor a massa específica do concreto fresco, menor será o consumo de cimento, o que será mais econômico produzir certa quantidade de concreto.

5.8.7.3 Resistência à compressão

Está comprovado em diversos estudos que a introdução de resíduo de borracha no concreto faz com que haja uma diminuição da sua resistência à

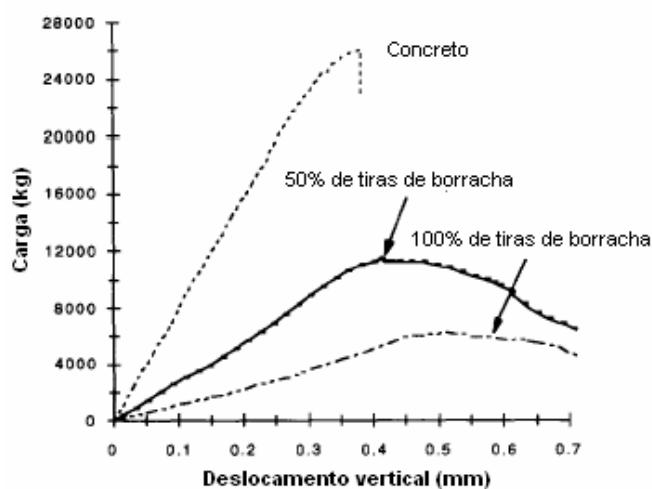
compressão, e essa perda de resistência aumenta com uma maior substituição de agregado miúdo natural pelo resíduo de borracha.

Segundo Topçu et al. (1997), 35% é a quantidade máxima que se pode fazer a substituição de agregado miúdo por resíduo de borracha sem comprometer de forma significativa a resistência mecânica do concreto. O mesmo recomenda o uso de resíduo de borracha com diâmetro não superior a 1,0 mm.

Em estudos realizados por Topçu et al. (1997), utilizando a borracha em substituição ao agregado graúdo, seus resultados de resistência não foram satisfatórios, porém foi observado que a capacidade de absorver energia plástica foi aumentada, fazendo com que o concreto pudesse sofrer altas deformações antes da ruptura.

Esse aumento da capacidade de deformação também foi observado por Toutanji (1996), que quanto maior a quantidade de substituição da borracha de pneu pelo volume do agregado, maior era a capacidade de deformação do concreto, como mostra a Figura 21.

Figura 21 - Curva de carga x deformação de concretos com adição de borracha de pneu



Fonte: TOUTANJI (1996)

Nos estudos de Accetti e Pinheiro (2000), verificaram que fibras de borracha funcionavam como barreira na propagação de fissuras durante o endurecimento do concreto, evitando o surgimento prematuro.

A granulometria das fibras também influencia nas propriedades mecânicas do concreto. A adição de fibras com granulometrias de 0,8 a 2,38 mm proporcionam valores superiores de resistência ao concreto do que fibras com granulometria inferior a 0,8 mm (NIRSCHL et al., 2002).

Para Boaventura (2011), concretos produzidos com resíduo de pneu apresentam reduções nas propriedades mecânicas devido a sua natureza, formato e textura desses resíduos, pois são mais leves e possuem propriedades que são diferentes de um agregado miúdo natural.

Em estudo feito por Azim et al. (2008), os mesmos observaram uma queda de 35% na resistência à compressão axial em concretos produzidos com resíduos de pneu, comparando ao concreto convencional. Os mesmos autores também verificaram uma queda na resistência quando aumentavam a quantidade de resíduo de borracha e a relação a/c.

5.8.8 Aplicação na Construção Civil

O resíduo de pneu proveniente da recauchutagem é um material promissor, tendo algumas aplicações na indústria da construção civil devido a baixa densidade, elasticidade, capacidade de absorver energia e por apresentar bom isolamento térmico e acústico (PCZIECZEK, 2017).

Para Boaventura (2011), existem diversas aplicações do resíduo de borracha na construção civil, como drenagem, pavimentação asfáltica, pistas esportivas, concreto e argamassas.

Estudos realizados por Partala (2009) comprovaram a viabilidade do emprego do resíduo de borracha em materiais de engenharia. Concreto contendo 15% de resíduo de borracha em substituição parcial do agregado miúdo, obtiveram uma resistência à compressão de 28 MPa, podendo ser utilizado com função estrutural.

Mavroulidoy e Figueiredo (2010) verificaram que a resistência à compressão do concreto diminui conforme adicionado resíduo de borracha, contudo pode ser utilizado em aplicações estruturais que requerem baixa resistência à compressão.

Angelin (2018) estudou o comportamento mecânico, térmico e acústico do concreto leve auto adensável emborrachado, 75% de argila expandida C0500, 25% de argila expandida C1506 (substituindo o agregado graúdo) e 15% de resíduo de borracha de pneu em substituição do agregado miúdo. Verificou que atende a necessidade de produção de concretos fluidos, leves e resistentes, podendo ser aplicado tanto para fins estruturais como para vedação.

Santos (2005) avaliou o concreto contendo 2% de resíduo de borracha em relação ao peso do cimento, chegando a uma resistência à tração na flexão de 15

MPa, estando dentro da faixa satisfatória para ser utilizado para produção de placas pré-moldadas.

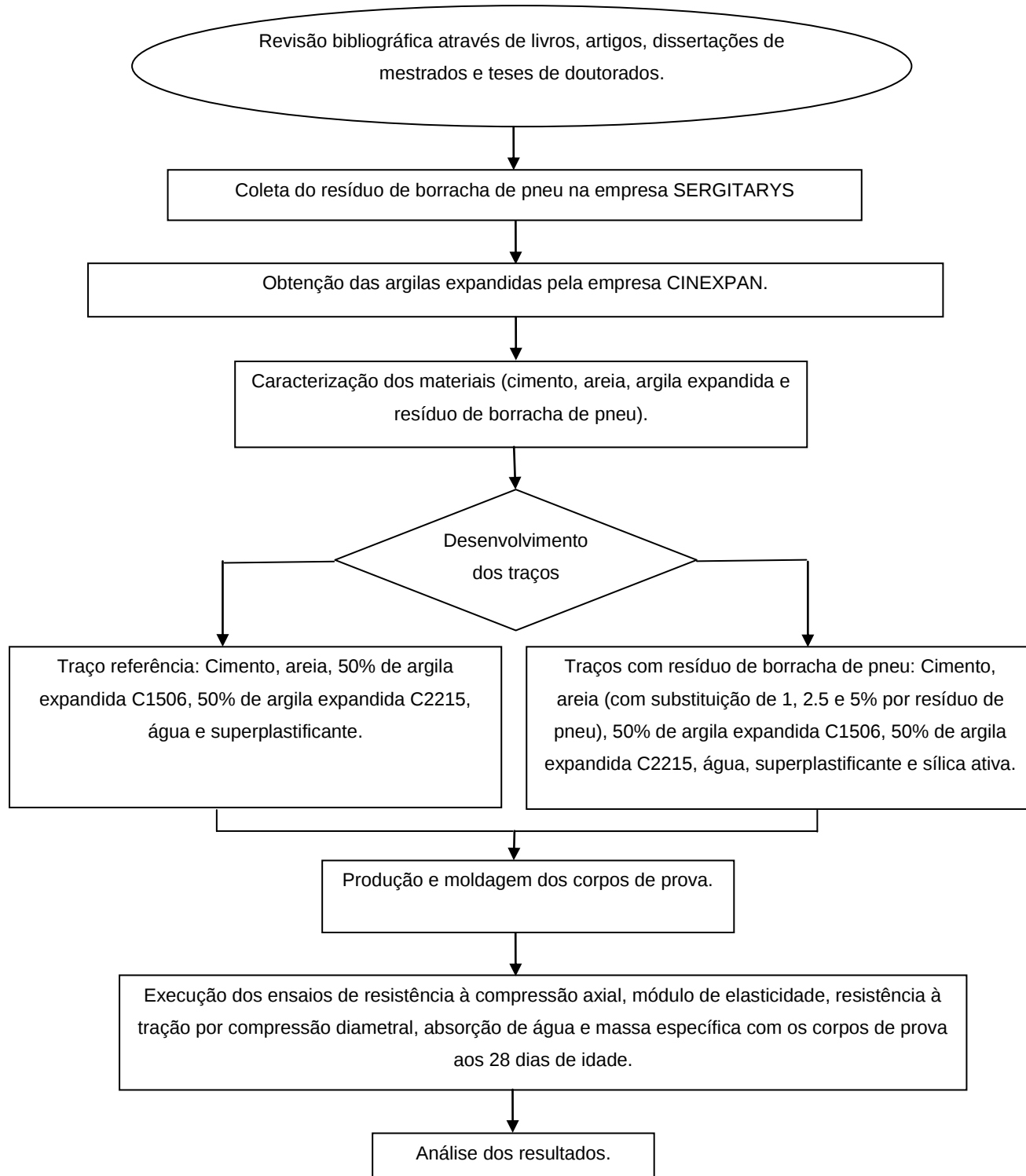
Bravo (2014) constatou que substituindo parcialmente o agregado miúdo natural por até 26,8% de resíduos de pneu, o concreto apresentou uma resistência à compressão de 2,74 MPa, atendendo as prescrições normativas para a confecção de blocos vazados para alvenaria.

Martins (2005) e Barboza et al. (2004) empregaram a borracha de pneus em concreto de alta resistência pela economia dos agregados naturais e pela possível melhoria na ductilidade.

6 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso foi dividida nas seguintes etapas, como mostra o fluxograma (Figura 22):

Figura 22 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: O Autor (2019)

7 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta o detalhamento dos procedimentos experimentais adotados para o estudo dos concretos leves de argila expandida adicionando o resíduo de borracha de pneu, resumido nas seguintes etapas descrito no Quadro 8:

Quadro 8 - Resumo dos procedimentos experimentais

Etapa	Procedimento
1	Coleta do resíduo de borracha de pneu e obtenção das argilas expandidas
2	Caracterização dos materiais
3	Estudo dos traços
4	Produção dos concretos leves com e sem resíduo de borracha de pneu
5	Propriedades avaliadas

Fonte: O Autor (2019)

7.1 COLETA DO RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU

O resíduo de borracha de pneu foi coletado na Empresa SERGITARYS INDUSTRIAL, que opera no processo de recapeamento de pneus, na cidade de Nossa Senhora do Socorro, no Estado de Sergipe, e levado ao Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Sergipe – Campus Estância.

Na Empresa, para que ocorra o processo de recauchutagem (Figura 23), são seguidos os seguintes passos:

- A estrutura de um pneu usado não pode apresentar cortes e deformações extensas e profundas;
- A banda de rodagem (parte externa do pneu que entra em contato com o solo) deve apresentar sulcos e saliências que lhe permitam a aderência ao solo;
- O pneu usado não pode apresentar sinais de desgaste excessivo das bandas de rodagem, como cinturas (parte interna que compõe o pneu) expostas;
- Não pode apresentar sinais de contaminação de óleo, graxa ou ácidos.

Com essas observações, o início do processo de recauchutagem começa com:

- A entrega do pneu à empresa coletora, trazido por particulares ou outras empresas conveniadas;
- Inspeção ou limpeza do pneu. Alguns pneus são reprovados logo na inspeção, pois apresentam danos que limitam sua vida útil, e são denominados de pneus inservíveis, e que ganham outro destino ecologicamente correto;

- Exame preliminar para selecionar os pneus que estejam em condições de reforma;
- Em seguida o pneu é levado a um torno (máquina de raspagem onde gera o resíduo de borracha), onde vai ser realizado o desgaste da banda de rodagem e deixa-la com a superfície aderente para a aplicação da nova banda de rodagem;
- Logo em seguida, o pneu é levado para o setor de escareação (forma de raspagem), onde vai ser eliminada qualquer deformação existente. Se o pneu apresentar perfuração, é feita a reparação interna com a utilização de manchões (plaquetas de borracha) e reparos (faixa adesiva), aplicados com cola especial, onde irá devolver à região a resistência original;
- Aplicação de uma cola especial na superfície externa do pneu e é colocada a nova banda de rodagem;
- O pneu é montado e levado na máquina de vulcanização, que também é colocado o saco de ar interno e protetores nas bordas centrais para manter o formato original do pneu;
- Os sulcos do pneu são desenhados no equipamento chamado prensa mecânica para vulcanização a uma temperatura em torno de 160°C;
- Após o processo de vulcanização, o pneu é retirado e feito uma nova inspeção para garantir se o pneu está em conformidade com o padrão;
- O pneu é colocado para esfriar por um tempo mínimo de 8 horas antes de ser posto a uso.

Figura 23 - Processo de recauchutagem do pneu: A) Entrega do pneu, B) Inspeção ou limpeza, C) Raspagem do pneu, D) Pneu raspado, E) Local de armazenamento do resíduo de pneu, F) Aplicação da nova banda de rodagem, G) Forma com desenhos dos sulcos, H) Prensa mecânica, I) Retirada do pneu da prensa, (J) Inspeção e resfriamento



Fonte: O Autor (2019)

O resíduo de borracha de pneu utilizado na pesquisa é gerado na etapa C, como pode ser visto na Figura 23.

Como parte do material (Figura 24) que foi coletado estava com aspecto úmido, o mesmo foi colocado na estufa para secagem por 24 horas a uma temperatura de 105°C. Em seguida, o material foi submetido aos ensaios de granulometria (NBR NM 248/2003), massa unitária (NBR NM 45/2006) e massa específica (NBR 9776/1988).

Figura 24 - Resíduo de borracha de pneu



Fonte: O Autor (2019)

7.2 OBTENÇÃO DA ARGILA EXPANDIDA

As amostras de argila expandida vieram da CINEXPAN/SP, única fábrica produtora no Brasil. Foram pedidos dois diâmetros de argilas expandidas (C1506 e C2215). As argilas expandidas foram levadas ao Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Sergipe – Campus Estância, onde passaram por ensaios de análise granulométrica segundo a (NBR NM 248/ 2003), e por ensaio de massa unitária (NBR NM 45/2006).

A Figura 25 ilustra as duas graduações de argila expandida utilizadas como agregado graúdo.

Figura 25 - Argila expandida C1506 (à esquerda) e C2215 (à direita)



Fonte: O Autor (2019)

Nesta pesquisa foram feitos testes iniciais com um só diâmetro de argila expandida (C2215), e foi verificado que com a utilização da mesma, formavam muitos vazios entre os grãos, o que comprometia a resistência do concreto. Diante desse fato, foi adotado o uso de uma granulometria menor (C1506) com diâmetro máximo de 19 mm, para que esse problema fosse minimizado. Portanto, optou-se em utilizar 50% da C1506 e 50% da C2215.

7.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

7.3.1 Caracterização do Cimento Portland

O tipo de cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP II F – 32 (Cimento Portland Composto com fíler), pelo fato de ser facilmente encontrado no mercado e utilizado na região de Estância/SE. A NBR 11578/1997 prescreve este cimento possuindo em sua composição em torno de 90 a 94% de clínquer e gesso, 6 a 10% de material calcário.

7.3.1.1 Módulo de finura

O ensaio da determinação do módulo de finura do cimento (Figura 26) é prescrito pela NBR 11579/2013, por meio da peneira 75 μm (nº200), pelo procedimento manual, onde foi determinada a porcentagem, em massa, de cimento cujas dimensões de grãos são superiores a 75 μm , ou seja, a fração retida.

Figura 26 - Ensaio de módulo de finura do cimento



Fonte: O Autor (2019)

7.3.1.2 Consistência normal

A NBR 16606/2018 estabelece o método de ensaio para a determinação da consistência normal (Figura 27) do cimento Portland, onde, por meio de tentativas de porcentagem de água em relação ao peso do cimento, conseguirá a melhor consistência do cimento.

Figura 27 - Ensaio de consistência normal



Fonte: O Autor (2019)

7.3.1.3 Tempo de pega

A NBR 16607/2018 prescreve o método de determinação do tempo de pega da pasta de cimento Portland por meio do aparelho de Vicat (Figura 28). A pasta de consistência normal do cimento, para o ensaio de tempo de pega, é preparada de acordo com NBR 16606/2018. Após a mistura, a pasta de cimento é colocada no molde do aparelho de Vicat, situando-o sob a agulha.

Figura 28 - Aparelho de Vicat



Fonte: O Autor (2019)

7.3.1.4 Massa específica

A NBR 16605/2017 prescreve o método para se determinar a massa específica do cimento pelo método do frasco volumétrico de Le Chatelier (Figura 29). Esse método fixa o modo pelo qual se determina a massa específica de materiais finamente pulverizados.

Figura 29 - Frasco de Le Chatelier



Fonte: O Autor (2019)

7.3.1.5 Expansibilidade do cimento

A NBR 11582/2016 prescreve o ensaio para se determinar a expansibilidade do cimento por meio do aferidor e agulha de Le Chatelier (Figura 30). Este ensaio tem como objetivo verificar a expansibilidade a frio da pasta de cimento encontrada no ensaio de consistência normal (NBR 16606/2018).

Figura 30 - Ensaio de expansibilidade do cimento



Fonte: O Autor (2019)

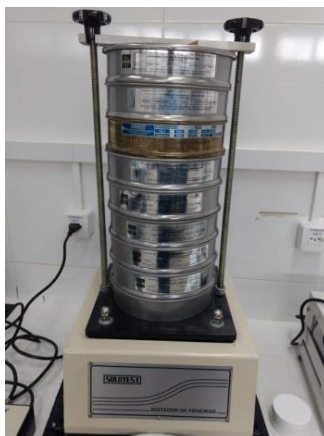
7.3.2 Caracterização do Agregado Miúdo Natural

O agregado miúdo natural utilizado neste estudo foi a areia lavada, proveniente da região de Estância/SE e caracterizada no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Sergipe – Campus Estância, de acordo com as normas vigentes. Antes do início dos ensaios de caracterização, o agregado miúdo natural foi seco em estufa por 24 horas a uma temperatura em torno de 105 °C.

7.3.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica do agregado miúdo natural foi seguindo as recomendações da NBR NM 248/2003. O material foi dividido em duas amostras distintas de 500g e passadas pelas peneiras de aberturas entre 0,15 a 4,75 mm em um peneirador mecânico durante 5 minutos (Figura 31).

Figura 31 - Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo natural



Fonte: O Autor (2019)

7.3.2.2 Massa unitária

A massa unitária do agregado miúdo natural foi determinada seguindo a NBR NM 45/2006 pelo método A (Figura 32). A massa unitária compactada é a relação entre sua massa e seu volume compactado, considerando também os vazios entre os grãos.

Figura 32 - Determinação da massa unitária do agregado miúdo natural



Fonte: O Autor (2019)

7.3.2.3 Massa específica

A massa específica do agregado miúdo natural é obtida através do ensaio descrito pela NBR 9776/1988, pelo método do frasco de Chapman (Figura 33). Duas amostras de 500 g de agregado miúdo natural são colocadas nos frascos de Chapman, estes preenchidos com água até a marca de 200 ml, e em seguida feito a leitura do nível atingido no gargalo do frasco ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo natural.

Figura 33 - Determinação da massa específica do agregado miúdo natural



Fonte: O Autor (2019)

7.3.3 Caracterização da Argila Expandida

Os ensaios de caracterização das argilas expandidas foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Sergipe – Campus Estância, de acordo com as normas vigentes.

7.3.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica da argila expandida (Figura 34) foi seguida as recomendações da NBR NM 248/2003. Foram pesadas duas amostras de 5 kg para cada tamanho de argila (C1506 e C2215) e passadas pelas peneiras de aberturas entre 2,36 a 25 mm por um tempo de 5 minutos no peneirador mecânico, e em seguida as amostras foram peneiradas manualmente.

Figura 34 - Ensaio de granulometria das argilas expandidas C1506 (à esquerda) e C2215 (à direita)



Fonte: O Autor (2019)

7.3.3.2 Massa unitária

As amostras de argila expandida foram analisadas por meio do ensaio de massa unitária no estado compactado, realizado de acordo com o método A, conforme a NBR NM 45/2006 (Figura 35). Este ensaio tem como objetivo encontrar a relação entre a massa e o volume compactado, considerando também os vazios entre os grãos.

Figura 35 - Determinação da massa unitária da argila expandida



Fonte: O Autor (2019)

7.3.4 Caracterização do Resíduo de Borracha de Pneu

Os ensaios de caracterização do resíduo de borracha de pneu foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Sergipe – Campus Estância, de acordo com as normas vigentes.

7.3.4.1 Análise granulométrica

Devido boa parte do resíduo de borracha de pneu apresentar formato semelhante à fibra (alongado), fica difícil determinar a sua granulometria como ocorre para os agregados miúdos mais usuais. Porém, o resíduo de borracha foi submetido a análise granulométrica tradicional pela NBR NM 248/2003, como mostra a Figura 36. Foi utilizado, nesta pesquisa, o resíduo de borracha de pneu passante na peneira de abertura 1,18 mm, ou seja, em forma de pó, pois de acordo com Topçu et al. (1997), o diâmetro das partículas de resíduo de borracha não devem ser superiores à 1,0mm.

Figura 36 - Determinação da composição granulométrica do resíduo de borracha de pneu



Fonte: O Autor (2019)

7.3.4.2 Massa unitária

A determinação da massa unitária do resíduo de pneu (Figura 37) foi seguindo as recomendações da NBR NM 45/2006 pelo método A. Este ensaio tem como objetivo encontrar a relação entre a massa e o volume, considerando também os vazios entre os grãos.

Figura 37 - Determinação da massa unitária do resíduo de borracha de pneu



Fonte: O Autor (2019)

7.3.4.3 Massa específica

Para a determinação da massa específica dos resíduos de borracha de pneu (Figura 38), seguiu as recomendações da NBR 9776/1988. Porém, de acordo com pesquisas de Vasconcelos (2009), foi preciso fazer a substituição da água no frasco de Chapman por álcool da marca TUPI 70°, pois a densidade do resíduo de borracha de pneu é próxima a da água, fazendo com que o resíduo flutuasse e não sendo possível a realização deste ensaio.

Figura 38 - Determinação da massa específica do resíduo de borracha de pneu



Fonte: O Autor (2019)

7.4 SUPERPLASTIFICANTE E SÍLICA ATIVA

Segundo Lanzon et al. (2015), partículas de borracha faz aumentar a zona de transição entre o próprio material e a pasta de cimento. Isso acontece pelo fato da borracha ser antiaderente e não sendo possível aderir à pasta de cimento, fazendo

com que o concreto fique mais frágil, surgindo microfissuras e diminuindo a resistência do concreto.

De acordo com Angelin (2018), para diminuir a zona de transição, recomenda o uso de adições minerais, como por exemplo, a sílica ativa, que além de melhorar a zona de transição e consequentemente melhorar a resistência mecânica e durabilidade do concreto, evita a segregação do agregado. Autores como Martins, (2005) e Vasconcelos (2009) recomendam o uso de até 10% de sílica ativa em relação ao peso do cimento.

Em relação ao superplastificante, pela literatura, não havia um padrão para seu uso. Então, nesta pesquisa foram feitos diversos testes, onde foram usados 0.3, 0.5 e 0.7% de superplastificante, até encontrar um valor considerável para a trabalhabilidade do concreto. Com isso, o valor adotado foi com 0,5% de superplastificante em relação ao peso do cimento.

O superplastificante e a sílica (Figura 39) foram doados pela Empresa POLIMIX CONCRETO, onde terão como objetivo melhorar a trabalhabilidade e a resistência, respectivamente, tanto do concreto referência como do concreto com resíduo de borracha de pneu. Foi utilizado na pesquisa o superplastificante tipo II da marca MATCHEM, modelo MAXIFLUID PX 1185, e a sílica ativa da marca FERBASA.

Figura 39 - Sílica ativa (à esquerda) e Superplastificante (à direita)



Fonte: O Autor (2019)

7.5 ÁGUA

A água utilizada nesta pesquisa é proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Estância/SE.

7.6 DOSAGEM DOS MATERIAIS

A metodologia utilizada para o cálculo dos traços foi com base na adaptação do método de dosagem da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) para a produção do concreto com argila expandida e para o concreto com a adição de resíduo de borracha de pneu. Foram estabelecidos 4 (quatro) traços com as seguintes nomenclaturas:

- Referência: Cimento, agregado miúdo natural, agregado graúdo (50% de argila expandida C1506 e 50% de argila expandida C2215), água e superplastificante;
- Mistura 1: Cimento, agregado miúdo natural, agregado graúdo (50% de argila expandida C1506 e 50% de argila expandida C2215), água, superplastificante, 1% de resíduo de borracha de pneu (em substituição do agregado miúdo natural) e sílica ativa;
- Mistura 2: Cimento, agregado miúdo natural, agregado graúdo (50% de argila expandida C1506 e 50% de argila expandida C2215), água, superplastificante, 2,5% de resíduo de borracha de pneu (em substituição do agregado miúdo natural) e sílica ativa;
- Mistura 3: Cimento, agregado miúdo natural, agregado graúdo (50% de argila expandida C1506 e 50% de argila expandida C2215), água, superplastificante, 5% de resíduo de borracha de pneu (em substituição do agregado miúdo natural) e sílica ativa.

A Tabela 1 apresenta o traço e do concreto leve referência e do concreto com resíduo de borracha de pneu.

Tabela 1 - Traço do concreto leve de argila expandida com resíduo de borracha de pneu (kg/m³)

Materiais	Traço do concreto leve de argila expandida (Referência)	Traço unitário do concreto leve com 1% de resíduo de borracha	Traço unitário do concreto leve com 2,5% de resíduo de borracha	Traço unitário do concreto leve com 5% de resíduo de borracha
Cimento	1	1	1	1
Areia	3,12	3,09	3,04	2,96
Resíduo de Borracha	-	0,03	0,08	0,16
Argila Expandida C1506	0,53	0,53	0,53	0,53
Argila Expandida C2215	0,43	0,43	0,43	0,43
Relação a/c	0,5	0,5	0,5	0,5
Superplastificante (%)	0,5	0,5	0,5	0,5
Sílica Ativa (%)	-	10	10	10

Fonte: O Autor (2019)

7.7 PRODUÇÃO DO CONCRETO LEVE

Este capítulo apresenta o processo de produção dos concretos leves. Para isto, foram moldados 6 (seis) corpos de prova para ensaio de resistência à compressão axial, 6 (seis) corpos de prova para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral e mais 3 (três) corpos de prova para o ensaio de absorção de água e massa específica aos 28 dias de idade de acordo com a NBR 5738/2016, totalizando 15 (quinze) corpos de prova cilíndricos, com dimensões de (100x200) mm (Figura 41). Foram moldadas ainda placas com dimensões de 20x40 cm de cada tipo de mistura para verificação do seu peso e aparência (Figura 40).

Figura 41 - Corpos de prova cilíndricos



Fonte: O Autor (2019)

Figura 40 - Placas das misturas de concreto



Fonte: O Autor (2019)

As argilas expandidas foram saturadas em água por 24 horas antes da concretagem, pois de acordo com Rossignolo (2003), agregados leves com índice

de absorção maiores que 10% em 24 horas de imersão, é recomendada a saturação prévia antes da mistura. Não sendo realizado esse processo, haverá dificuldade em manter a trabalhabilidade adequada do concreto durante o lançamento. No caso desta pesquisa em questão, esse índice de absorção encontrado foi referente à 13,6%.

7.7.1 Mistura

Para a produção do concreto, os materiais foram misturados em uma betoneira com capacidade de 200 L (Figura 42), conforme a seguinte sequência:

- Colocado 50% de cimento, areia, argila expandida (C1506 e C2215) e água, misturados durante 3 minutos;
- Feito uma pausa durante alguns segundos para a raspagem das faces internas da betoneira, afim de retirar o material preso;
- Adicionado os outros 50% de cimento, areia, argila expandida (C2215 e C1506) e água, misturados por mais 3 minutos;
- Feito uma pausa para adicionar o superplastificante e em seguida misturado os materiais por mais 5 minutos.

Figura 42 - Betoneira com capacidade de 200 litros



Fonte: O Autor (2019)

Para a produção do concreto com o resíduo de borracha de pneu, seguiu-se o passo a passo descrito logo abaixo:

- Colocado na betoneira 50% dos materiais (cimento, areia, resíduo de pneu, argila expandida (C1506 e C2215) e água) misturados por 3 minutos;
- Feito uma pausa durante alguns segundos para a raspagem das faces internas da betoneira, a fim de retirar o material preso;
- Adicionado os outros 50% (cimento, areia, argila expandida (C1506 e C2215) e água), além de toda a sílica ativa, e misturados por mais 3 minutos;

- Feito uma pausa para adicionar o superplastificante e em seguida misturado os materiais por mais 5 minutos.

7.7.2 Adensamento

Na etapa de moldagem dos corpos de prova, os moldes foram revestidos internamente com uma fina camada de óleo lubrificante, como estabelece a NBR 5738/2016, onde descreve o procedimento para a moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos ou prismáticos.

De acordo com a NBR 5738/2016, estabelece duas camadas manuais, cada uma com 12 golpes para adensamento do concreto em um corpo de prova com diâmetro de 100 mm (Figura 43).

Figura 43 - Moldagem dos corpos de prova pelo método de adensamento manual



Fonte: O Autor (2019)

7.7.3 Cura

De acordo com a NBR 5738/2016, após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram levados para dentro do laboratório de materiais de construção, longe de qualquer ação, protegido de intempéries que pudesse perturbar o concreto, durante 24 horas para a cura inicial. Passada às 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados (Figura 44), identificados e colocados em um tanque com água (Figura 45) por 28 dias, até o dia de realização dos ensaios.

Figura 44 – Desmoldagem dos corpos de prova



Fonte: O Autor (2019)

Figura 45 – Corpos de prova submersos em água



Fonte: O Autor (2019)

7.8 PROPRIEDADES AVALIADAS

Os concretos leves de cada traço foram avaliados tanto no estado fresco, pelo ensaio do abatimento do tronco de cone, como no estado endurecido, pelos ensaios de absorção de água por imersão, massa específica, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral.

7.8.1 Trabalhabilidade

A NBR NM 67/1998 especifica o método para a avaliação da trabalhabilidade do concreto no estado fresco por meio do abatimento do tronco de cone. Este ensaio é realizado após a mistura dos materiais na betoneira (Figura 46).

Figura 46 - Ensaio de abatimento do tronco de cone



Fonte: O Autor (2019)

7.8.2 Absorção de Água e Massa Específica

Os ensaios de absorção de água e massa específica foram seguindo as recomendações da NBR 9778/2009, após um período de 28 dias de cura dos corpos de prova.

Foram moldados três corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Sergipe – Campus Estância.

O ensaio foi realizado de acordo com as seguintes etapas:

- Retirada do corpo de prova da água após 28 dias de cura, a superfície era seca para a retirada da umidade, e em seguida era determinado seu peso saturado (m_{sat});
- Na segunda etapa o corpo de prova era levado para uma balança hidrostática (Figura 47) onde foi determinado seu peso imerso em água (m_i);

Figura 47 - Balança hidrostática



Fonte: O Autor (2019)

- Por fim, os corpos de prova foram levados para uma estufa (Figura 48) com temperatura de 105° C em um período de 72 horas para a determinação do seu peso seco (m_s).

Figura 48 - Corpos de prova na estufa



Fonte: O Autor (2019)

Obtido os pesos mencionados nas etapas acima, foi possível determinar a absorção de água por imersão e a massa específica dos corpos de prova pelas seguintes expressões:

- Absorção de água por imersão

$$Ab_{imersão} = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

- Massa específica

$$ME_{seca} = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (2)$$

7.8.3 Resistência à Compressão Axial

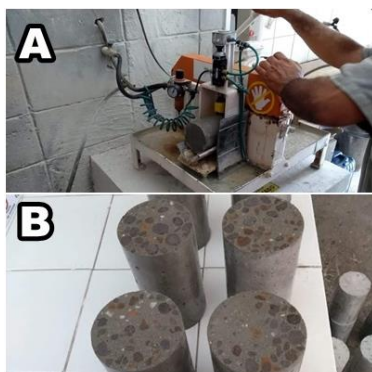
O ensaio de resistência à compressão axial foi determinado seguindo as prescrições da NBR 5739/2018. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, com idade de 28 dias.

Para cada traço foram moldados 6 (seis) corpos de prova. O ensaio foi realizado no Laboratório do Departamento de Construção Civil da Universidade Federal de Sergipe, localizada em São Cristóvão.

Antes de realizar o rompimento do corpo de prova, os mesmos tiveram que passar por uma retífica (Figura 49) da marca STUHLERT – Modelo ST110/2011, devido a sua superfície apresentar irregularidade, o que poderia comprometer nos resultados.

O equipamento utilizado na realização do ensaio (Figura 50) foi em uma máquina universal da marca EMIC, modelo GR048 com capacidade máxima de 200 kN.

Figura 49 – A) Corpo de prova sendo retificado; B) Resultado do processo de retificação



Fonte: O Autor (2019)

Figura 50 - Ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: O Autor (2019)

7.8.3.1 Módulo de Elasticidade

O ensaio do módulo de elasticidade (Figura 51) foi realizado conforme as prescrições da NBR 8522/2017 para cada traço do concreto em 28 dias de cura, utilizando 2 corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. O ensaio foi realizado no Laboratório do Departamento de Construção Civil da Universidade Federal de Sergipe.

Figura 51 - Ensaio do Módulo de Elasticidade



Fonte: O Autor (2019)

7.8.4 Resistência à Tração Por Compressão Diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Figura 52) de cada traço foi determinado segundo as prescrições da NBR 7222/2011. Neste

ensaio foram utilizados corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, para idade de 28 dias.

Para cada traço foram moldados 6 corpos de prova. O ensaio foi realizado no Laboratório do Departamento de Construção Civil da Universidade Federal de Sergipe em uma máquina universal da marca EMIC, modelo GR048 com capacidade máxima de 200 kN.

Figura 52 - Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral



Fonte: O Autor (2019)

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados de caracterização dos materiais utilizados na pesquisa para a produção dos concretos leves. São apresentados os resultados de ensaios de absorção de água e massa específica, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral.

8.1 CIMENTO PORTLAND

A Tabela 2 apresenta, respectivamente, os ensaios de caracterização do cimento CP II F 32, bem como seus resultados e as normas prescritas para cada ensaio.

Tabela 2 - Propriedades físicas e químicas do cimento

	Resultados	Norma
Índice de Finura (%)	2,8	NBR 11579/2013
Início de pega	2h04min	NBR 16607/2018
Fim de pega	5h05min	NBR 16607/2018
Expansibilidade (mm)	0,83	NBR 11582/1991

Fonte: O Autor (2019)

De acordo com os dados apresentados na Tabela 2, o cimento CP II – F 32, utilizado na pesquisa, está de acordo com o parâmetro da NBR 11579/2013 onde cita que o valor do índice de finura deve ser menor ou igual a 12%. O tempo de fim de pega encontrado também está dentro dos parâmetros da NBR 16607/2018, a qual estabelece que o fim de pega deva ser menor ou igual a 600 minutos. O valor encontrado no ensaio de expansibilidade a frio está de acordo com a da NBR 16697/2018, onde estabelece que o valor deve ser menor ou igual a 5 mm.

8.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS

Este item aborda os resultados dos ensaios de análise granulométrica (agregado miúdo natural, argilas expandidas e resíduo de borracha de pneu), massa unitária (agregado miúdo natural, argilas expandidas e resíduo de borracha de pneu) e massa específica (cimento, agregado miúdo natural, argilas expandidas e resíduo de borracha de pneu).

8.2.1 Análise Granulométrica

8.2.1.1 Agregado miúdo natural (areia)

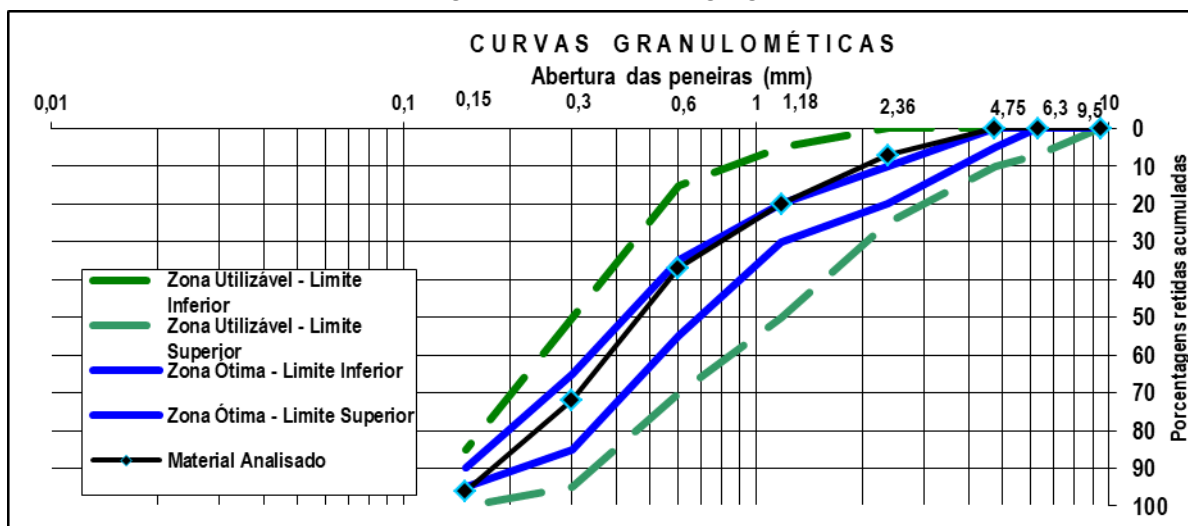
A Tabela 3 apresenta a análise granulométrica do agregado miúdo natural (areia) e o Gráfico 1 mostra a sua curva granulométrica, segundo as prescrições da NBR 248/2003.

Tabela 3 - Análise granulométrica do agregado miúdo natural

Peneiras (mm)	Amostra I (500g)	Amostra II (500g)	Média das Amostras I e II (500g)	Massa Retida (%)	Massa retida acumulada (%)	Massa Passante (%)
4,75	0	0	0	0	0	100
2,36	40	30	35	7	7	93
1,18	70	60	65	13	20	80
0,600	90	80	85	17	37	63
0,300	180	170	175	35	72	28
0,150	110	130	120	24	96	4
Fundo	10	30	20	4	100	0
Diâmetro Máximo (mm)						4,75
Módulo de Finura						2,32

Fonte: O Autor (2019)

Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural



Fonte: O Autor (2019)

De acordo com o Gráfico 1, o agregado miúdo natural enquadra-se parcialmente entre a zona utilizável e a zona ótima. O módulo de finura do agregado miúdo natural se enquadra na zona ótima, que de acordo com a NBR 7211/2005, esta zona possui uma variação entre 2,20 a 2,90.

A NBR NM 248/2003 classifica os limites de frações de tamanho dos grãos de agregado miúdo como: areia grossa (de 1,2 mm a 4,8 mm), areia média (de 0,3 mm a 1,2 mm) e areia fina (de 0,05 mm a 0,3 mm). De acordo com a distribuição granulométrica, a maior fração retida se encontra na peneira de abertura 0,3 mm, então, esta areia se classifica como fina.

8.2.1.2 Argila expandida

As Tabelas 4 e 5 e o Gráfico 2 apresentam as composições e as curvas granulométricas, respectivamente, dos dois tipos de argilas expandidas, segundo a prescrição da NBR 248/2003.

Tabela 4 - Análise granulométrica da argila expandida (C1506)

Peneiras (mm)	Amostra I (Kg)	Amostra II (Kg)	Média das Amostras I e II (Kg)	Massa Retida (%)	Massa retida acumulada (%)	Massa Passante (%)
25	0	0	0	0	0	100
19	0	0	0	0	0	100
12,5	1,170	0,930	1,050	21	21	79
9,5	2,320	2,300	2,310	46,2	67,2	32,8
6,3	1,230	1,360	1,295	25,9	93,1	6,9
4,75	0,230	0,360	0,295	5,9	99	1
2,36	0,010	0,010	0,010	0,2	99,2	0,8
Fundo	0,040	0,040	0,040	0,8	100	0
Diâmetro máximo (mm)						19
Módulo de Finura						2,65

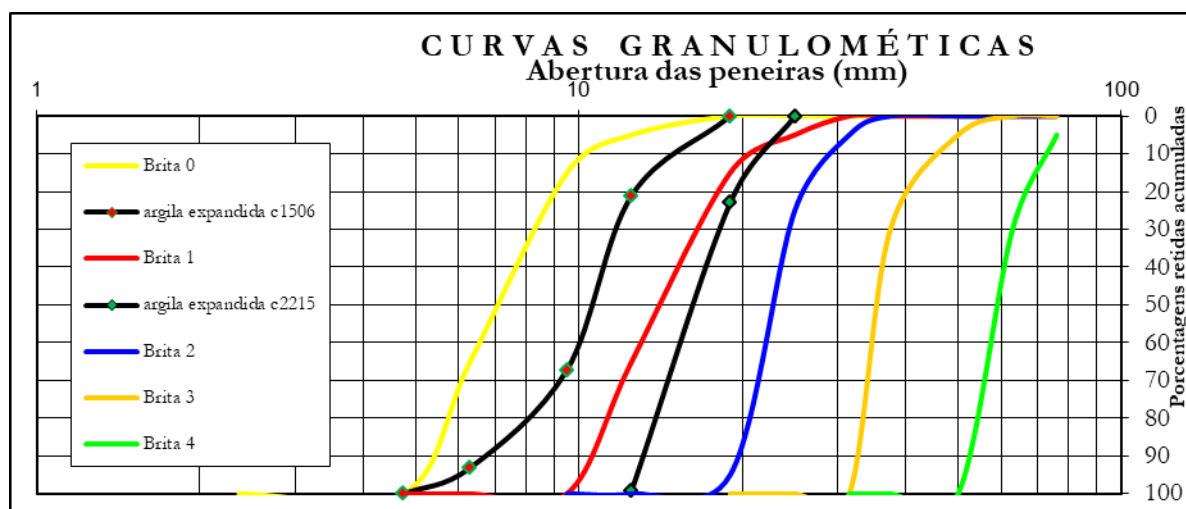
Fonte: O Autor (2019)

Tabela 5 - Análise granulométrica da argila expandida (C2215)

Peneiras (mm)	Amostra I (Kg)	Amostra II (Kg)	Média das Amostras I e II (Kg)	Massa Retida (%)	Massa retida acumulada (%)	Massa Passante (%)
31,5	0	0	0	0	0	100
25	0	0,010	0,005	0,1	0,1	99,9
19	1,080	1,210	1,145	22,9	23	77
12,5	3,900	3,720	3,810	76,2	99,2	0,8
9,5	0,010	0,040	0,025	0,5	99,7	0,3
6,3	0,002	0,003	0,0025	0,05	99,75	0,25
4,75	0	0	0	0	99,75	0,25
2,36	0	0	0	0	99,75	0,25
Fundo	0,008	0,017	0,0125	0,25	100	0
Diâmetro máximo (mm)						25
Módulo de Finura						3,22

Fonte: O Autor (2019)

Gráfico 2 - Curva granulométrica das argilas expandidas C1506 e C2215



Fonte: O Autor (2019)

Por meio da tabela 6 (Limites da composição granulométrica do agregado gráudo), da NBR 7211/2009, pode ser concluído que as argilas expandidas C1506 e C2215 estão, respectivamente, nas zonas granulométricas 9,5/25 (nº1) e 19/31,5 (nº2).

8.2.1.3 Resíduo de borracha de pneu

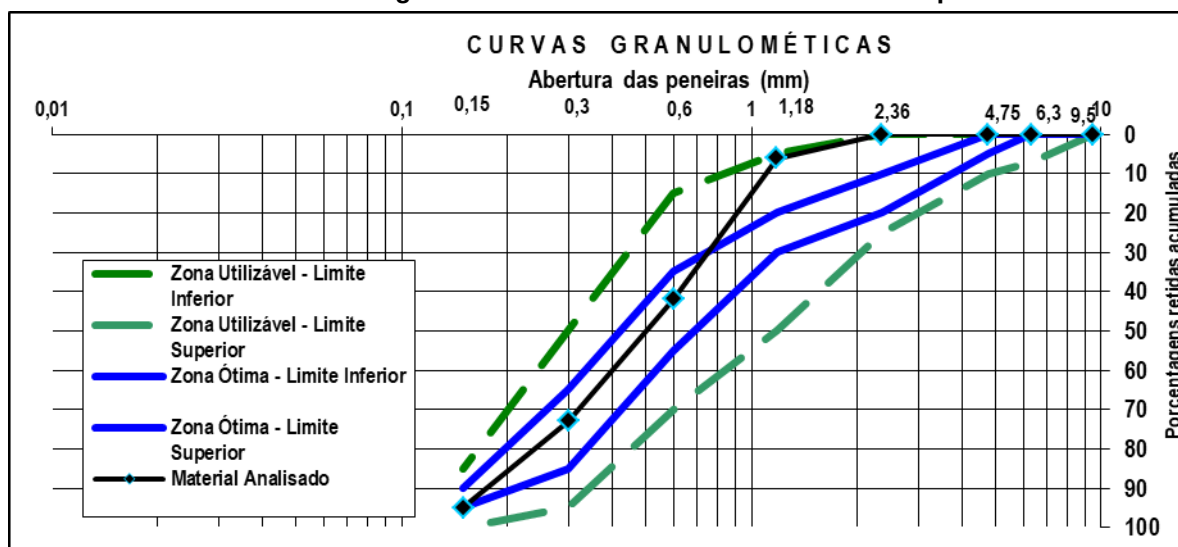
A Tabela 6 apresenta a composição granulométrica do resíduo de borracha, enquanto o Gráfico 3 a curva granulométrica, seguindo as recomendações da NBR 248/2003.

Tabela 6 - Análise granulométrica do resíduo de borracha de pneu

Peneiras (mm)	Amostra I (500g)	Amostra II (500g)	Média das Amostras I e II (500g)	Massa Retida (%)	Massa retida acumulada (%)	Massa Passante (%)
9,5	0	0	0	0	0	100
6,3	0	0	0	0	0	100
4,75	0	0	0	0	0	100
2,36	0	0	0	0	0	100
1,18	20	40	30	6	6	94
0,600	190	170	180	36	42	58
0,300	170	140	155	31	73	27
0,150	110	110	110	22	95	5
Fundo	10	40	25	5	100	0
Diâmetro máximo (mm)						1,18
Módulo de Finura						2,16

Fonte: O Autor (2019)

Gráfico 3 - Curva granulométrica do resíduo de borracha de pneu



Fonte: O Autor (2019)

De acordo com o Gráfico 3, o resíduo de borracha de pneu enquadra-se parcialmente na zona ótima, ficando dentro dos limites estabelecidos pela norma para uso em concreto.

De acordo com NBR 248/2003, a maior fração retida se encontra na peneira de abertura 0,600 mm, então este resíduo se classifica como médio.

O módulo de finura deste resíduo se enquadra na zona utilizável inferior, que de acordo com a NBR 7211/2005, esta zona possui uma variação entre 1,55 a 2,20.

O Quadro 9 mostra o módulo de finura do resíduo de borracha de pneu, resultante da análise granulométrica, de diferentes autores. Os valores encontrados por esses autores não são próximos ao valor encontrado na análise granulométrica do resíduo de borracha utilizado nesta pesquisa devido cada autor utilizar diâmetros diferentes.

Quadro 9 - Módulo de finura do resíduo de borracha de pneu de diferentes autores

Autores	Módulo de finura
Angelin (2018)	3,49
Akasaki et al. (2016)	3,81
Boaventura (2011)	3,32

Fonte: O Autor (2019)

8.2.2 Massa Unitária e Massa Específica

A Tabela 7 apresenta a massa unitária e massa específica de todos os materiais utilizados nesta pesquisa. Nota-se que a massa unitária da argila expandida bem como do resíduo de borracha de pneu são baixa de acordo com os encontrados em outros trabalhos.

Tabela 7 - Ensaio de caracterização das matérias-primas

Matéria Prima	Massa Unitária (g/cm ³)	Massa Específica (g/cm ³)
Areia	1,52±0,006	2,59±0,007
Cimento	-	3,27±0,005
Resíduo de borracha	0,38±0,007	1,18±0,014
Arg ex Ø15 mm	0,66±0,018	2,55±0,0017
Arg ex Ø22 mm	0,52±0,007	2,64±0,0035

Fonte: O Autor (2019)

Na pesquisa de Angelin (2018), em que utilizou o resíduo de borracha de pneu acumulado na peneira de 0,600 mm, apresentou massa específica igual a 1,16 g/cm³ e massa unitária de 0,40 g/cm³, valores próximos aos encontrados nesta pesquisa.

Boaventura (2011) utilizou em sua pesquisa o resíduo de borracha de pneu passante na peneira de 4,75 mm de abertura, em que o mesmo apresentou massa unitária de 0,38 g/cm³.

O resíduo de borracha de pneu utilizado na pesquisa de Pczieczek (2017) consistia em um resíduo com dimensão de 0,71 mm, onde o mesmo apresentou massa unitária de 0,36 g/cm³ e massa específica de 1,19 g/cm³.

A massa unitária e a massa específica do resíduo de borracha de pneu encontradas na pesquisa de Júnior et al. (2014) foi de 0,39 e 1,16 g/cm³, respectivamente, usando o passante na peneira de 4,75 mm de abertura.

8.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

O resultado do abatimento do tronco de cone variou em torno 10,5 cm referente à média das amostras (referência e com resíduo de borracha de pneu).

8.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Os resultados médios e os desvios padrões obtidos através dos ensaios do concreto no estado endurecido foram avaliadas através do método estatístico ONE WAY ANOVA. Segundo Walpole (2009), o software analisa a variância entre grupos utilizando o índice de significância de 95% cujo valor usualmente utilizado é ($p < 0,05$) para resultados significativos.

Para Almeida (2009) apud Montgomery & Runger (2003), são comparados os valores de F calculados com o valor de F tabelado. Se $F_{calculado} > F_{tabelado}$, os valores médios são significativos. Se $F_{calculado} < F_{tabelado}$, não haverá diferença significativas.

8.4.1 Propriedades Físicas

8.4.1.1 Absorção de água e massa específica

A Tabela 8 mostra os resultados de absorção de água por imersão e massa específica para todas as formulações. Os resultados representam a média de três valores encontrados nos ensaios.

Tabela 8 - Absorção de água por imersão e massa específica, aos 28 dias de idade, do concreto referência e dos concretos com 1, 2,5 e 5% de resíduo de borracha de pneu

Concretos	Absorção de água por imersão (%)	Massa específica (kg/m ³)
Concreto referência	7,69±0,15	1680±30
Concreto com 1% de resíduo de pneu	8,28±0,25	1577±31
Concreto com 2,5% de resíduo de pneu	9,55±1,44	1280±40
Concreto com 5% de resíduo de pneu	11,69±1,69	1277±15

Fonte: O Autor (2019)

Os resultados médios e os desvios padrões dos ensaios de absorção de água e massa específica foram analisados por meio do método estatístico ANOVA. Os resultados mostraram não significativos, podendo afirmar que as variações são iguais.

Foi observada uma tendência de aumento de valores de absorção por imersão quando há a incorporação do resíduo de borracha no concreto em relação ao concreto leve referência. Segundo Angelin (2018), isso ocorre pelo fato da borracha apresentar natureza hidrofóbica e superfície áspera, que faz aumentar o volume de vazios.

Houve um aumento de 7,67% de absorção de água na mistura com 1%, 24,19% na mistura de 2,5%, e 52% na mistura com 5% de resíduo de borracha de pneu, em relação ao concreto referência.

Esse aumento condiz com as pesquisas de Angelin (2018), Pczieczek (2017), Queiroz (2018) e Vasconcelos (2009), onde substituíram parcialmente o agregado miúdo natural por resíduo de borracha de pneu.

Em relação à massa específica, com a substituição do agregado miúdo pelo resíduo de borracha de pneu, houve uma redução de 7% na mistura com 1%, 24% nas misturas de concreto leve contendo 2.5%, e 23% na mistura com 5%, em relação ao concreto leve contendo somente argila expandida. Isso se deve ao fato da borracha possuir massa específica ($1,18 \text{ g/cm}^3$) menor do que a areia ($2,59 \text{ g/cm}^3$), ou seja, é menos denso, logo ocupará menos espaço, e consequentemente reduzirá o peso do concreto.

Os resultados das massas específicas condiz com Moraiva (2007) apud ASTM C330 (1991), que afirma que os concretos leves de argila expandida no estado seco devem apresentar massa específica entre 1400 a 1800 kg/m^3 .

Essas reduções de massa específica também são observadas nas pesquisas de Angelin (2018), Pcziezek (2017), Queiroz (2018) e Vasconcelos (2009), em que substituíram parcialmente o agregado miúdo natural por resíduo de borracha de pneu.

8.4.2 Propriedades Mecânicas

8.4.2.1 Resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral

Os resultados médios e desvios padrões de cada traço foram analisados por meio do método estatístico ANOVA. Os resultados mostraram que não são significativos, ou seja, as variações são iguais.

A Tabela 9 apresenta os resultados das resistências à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova na idade de 28 dias.

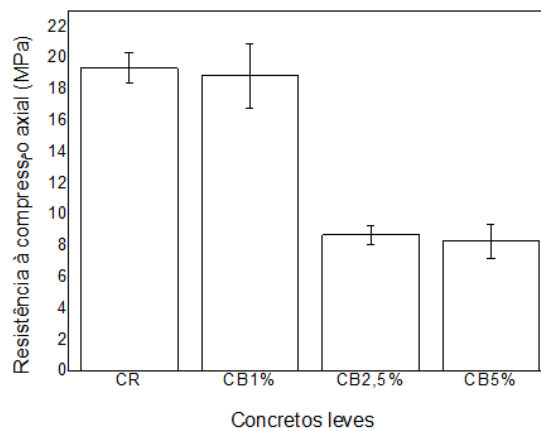
Tabela 9 - Resistência à compressão axial, resistência à compressão diametral e módulo de elasticidade aos 28 dias

Concreto	Resistência à compressão axial (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Referência	$19,43 \pm 0,98$	$1,68 \pm 0,29$	$17,57 \pm 2,5$
Com 1% de resíduo de borracha	$18,87 \pm 2,04$	$1,06 \pm 0,85$	-
Com 2.5% de resíduo de borracha	$8,72 \pm 0,61$	$1,03 \pm 0,16$	$10,10 \pm 0,11$
Com 5% de resíduo de borracha	$8,29 \pm 1,08$	$0,82 \pm 0,19$	$10,28 \pm 0,42$

Fonte: O Autor (2019)

De acordo com a Tabela 9 e do Gráfico 4, foi possível observar a influência do resíduo de borracha de pneu na resistência à compressão axial do concreto.

Gráfico 4 - Resistência à compressão axial, aos 28 dias, do concreto leve referência (CR) e concretos leves com borracha (CB1%, CB2.5% e CB5%)



Fonte: O Autor (2019)

O concreto leve referência foi o que apresentou maiores valores de resistência à compressão axial aos 28 dias. A partir da substituição parcial do agregado miúdo natural pelo resíduo de borracha, houve um decréscimo nos valores de resistência, sendo que era esperado, de acordo com trabalhos de (Angelin, 2018; Santos e Borja, 2007; Fioriti e Akasaki, 2004; Santos, 2005) mostrarem essa queda na resistência do concreto. Fazendo uma comparação, dos concretos leves com adição de borracha substituindo 1, 2,5 e 5% o agregado miúdo natural, representaram uma queda em suas resistências de 3, 56 e 58%, respectivamente, em relação ao concreto leve referência. Adicionalmente o traço com 1% de resíduo de borracha foi o que mais se aproximou do valor encontrado no traço referência sem resíduo de borracha, o que confirma que, quanto maior a porcentagem de resíduo de borracha substituindo o agregado miúdo natural, menor será a resistência do concreto.

Segundo a ACI 213R (2003), o concreto leve que venha a ser utilizado como elemento estrutural, deve apresentar resistência à compressão aos 28 dias de idade acima de 17 MPa. Portanto, o concreto referência e com 1% de resíduo de borracha de pneu, podem ser aplicados para peças estruturais. Já os concretos com 2.5 e 5% de resíduo de pneu, podem ser usados para fins não estruturais, como por exemplo, para placas de vedação, grelhas para bueiros.

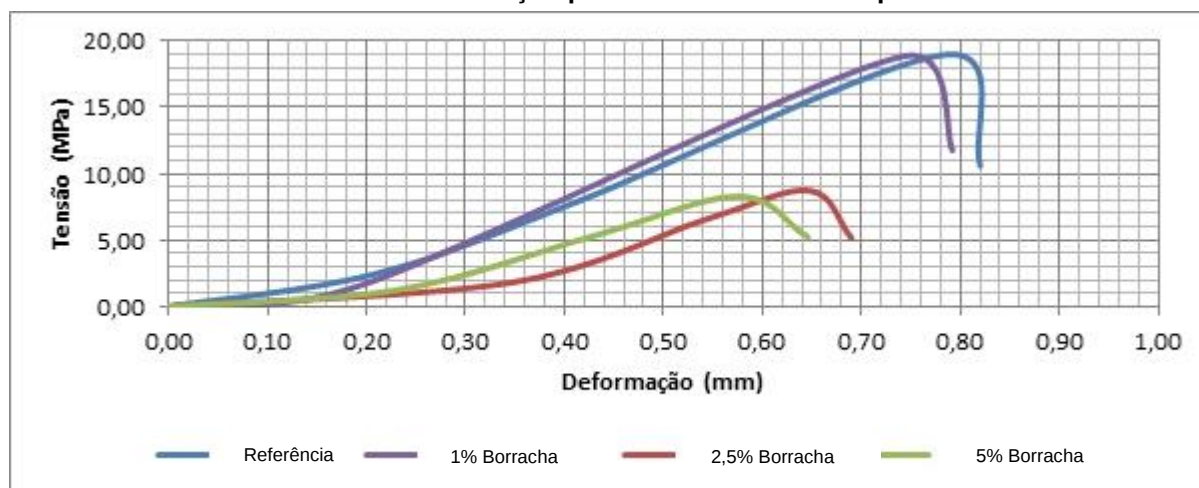
Porém, segundo a NBR 8953/2015 prescreve que a resistência mínima dos concretos estruturais devem ser maiores que 20 MPa. Abaixo disso, os concretos

são considerados não estruturais. Portanto, de acordo com essa norma, todas as misturas podem ser aplicadas para fins não estruturais.

No Gráfico 5, tensão x deformação para a resistência à compressão axial, o concreto referência obteve uma tensão máxima de 19,43 MPa, com uma deformação de 0,81 mm, onde foi verificado a ruptura brusca pós pico do concreto ensaiado, o que constata a sua fragilidade. A mistura com 1% de resíduo de borracha obteve uma resistência de 18,87 MPa, com uma deformação de 0,79 mm. A mistura com 2,5% de resíduo de borracha obteve um valor de 8,72 MPa, com uma deformação de 0,68 mm, e a mistura de 5% de resíduo de borracha obteve um valor de 8,29 MPa, com uma deformação de 0,65 mm. Nas misturas com resíduo de borracha, o gráfico mostra que após a carga ser aplicada no concreto, o mesmo não rompe bruscamente, devido à borracha ser um polímero artificial, apresentando comportamento dúctil.

Em sua pesquisa, Santos (2005) analisou o concreto com resíduo de borracha de pneu, em que apresentou uma ruptura suave no ramo descendente da curva tensão-deformação, diferente do concreto convencional, onde apresentou ruptura brusca.

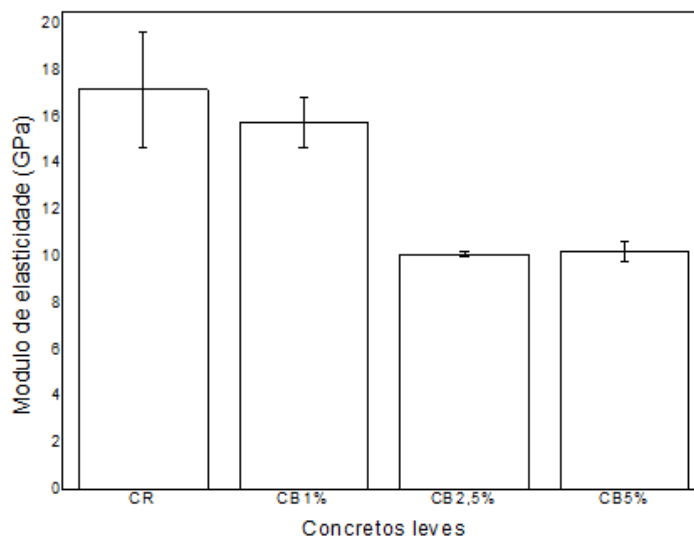
Gráfico 5 - Tensão x deformação para a resistência à compressão axial



Fonte: O Autor (2019)

No Gráfico 6 é mostrado os dados médios do ensaio de módulo de elasticidade, aos 28 dias, com os traços produzidos.

Gráfico 6 - Módulo de Elasticidade, aos 28 dias, do concreto leve referência (CR) e concretos leves com borracha (CB1%, CB2.5% e CB5%)



Fonte: O Autor (2019)

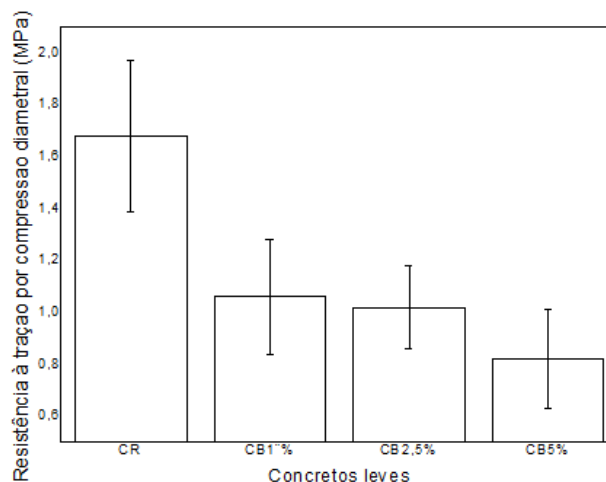
O maior valor de módulo de elasticidade encontrado foi do concreto leve referência, favorecido pelo fato deste concreto apresentar em sua composição somente argila expandida, ou seja, sem resíduo de pneu, o que lhe garantiu maior rigidez. Ao adicionar partículas menos rígidas, como a borracha, o módulo fica menor na região de deformação elástica.

Na pesquisa de Freitas (2007), em que substituiu 5 e 20% de areia por resíduo de borracha de pneu, obteve uma redução de 17 e 56,8%, respectivamente, no módulo de deformação em relação ao concreto referência, o que comprovou que o aumento no teor de resíduo de borracha de pneu implicou na diminuição no módulo de elasticidade do concreto.

Martins (2005), analisou o concreto de alto desempenho com 3 e 5% de resíduo de borracha de pneu fina, média e grossa em substituição da areia, onde os valores obtidos para os concretos com borracha foram reduzidos em torno de 12% em relação ao concreto referência.

O Gráfico 7 apresenta os valores do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para os traços de concreto leve.

Gráfico 7 - Resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, do concreto leve referência (CR) e concretos leves com borracha (CB1%, CB2.5% e CB5%)



Fonte: O Autor (2019)

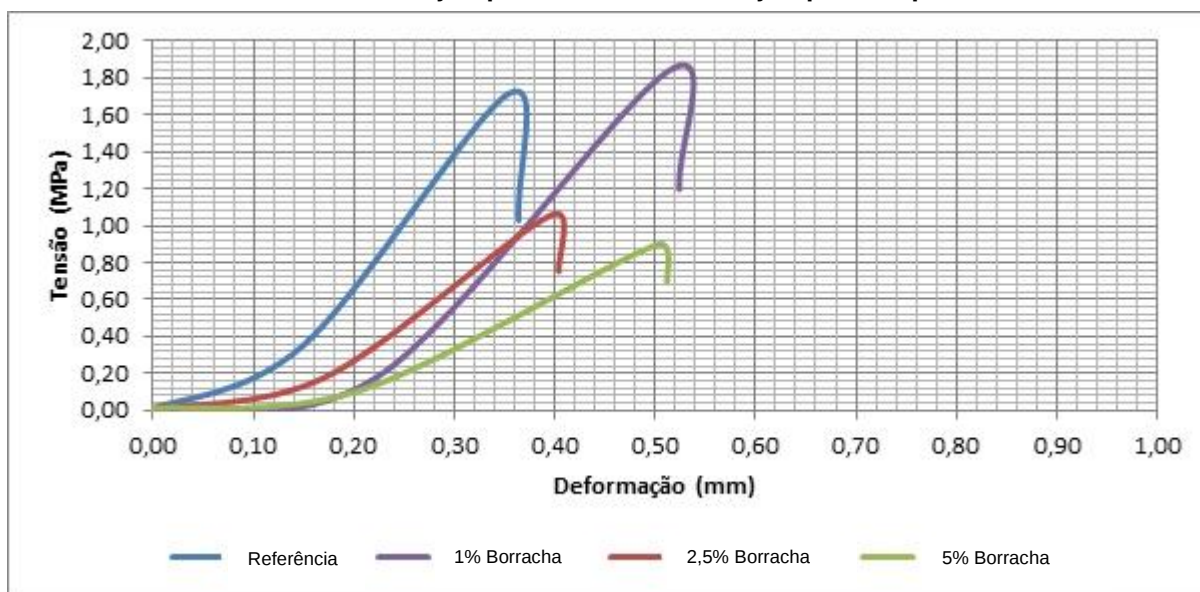
Assim como nos resultados do ensaio de resistência à compressão axial, foi possível observar que houve uma queda na resistência à tração por compressão diametral nos concretos leves com resíduo de borracha em relação ao concreto leve referência.

Autores como Santos (2005), Freitas (2007), Martins (2005), Meneguini (2003), também observaram esse decréscimo de resistência à tração por compressão diametral quando se adicionava resíduo de borracha de pneu.

Houve uma queda de 37%, em relação ao concreto referência, na resistência do concreto leve com 1% de substituição de agregado miúdo natural por resíduo de borracha, 40% no concreto leve com substituição de 2,5% de resíduo de borracha, e 52% no concreto leve contendo 5% de resíduo de pneu.

Os resultados obtidos condizem com o esperado, visto que em trabalhos realizados com substituição da areia por resíduo de borracha de pneu em concretos e argamassas mostraram uma diminuição nas resistências mecânicas com o aumento na quantidade desse resíduo (SALES et al., 2013; MENEGUINI, 2003).

No Gráfico 8, tensão x deformação da resistência à tração por compressão diametral, houve uma queda brusca em todos os traços de concreto. O concreto referência mostrou uma deformação de 0,36 mm, o concreto com 1% de resíduo de borracha obteve uma deformação de 0,52 mm, o concreto com 2,5% de resíduo de borracha apresentou uma deformação de 0,40 mm, e o concreto com 5% de resíduo de borracha uma deformação de 0,51 mm.

Gráfico 8 - Tensão x deformação para resistência à tração por compressão diametral

Fonte: O Autor (2019)

Observa-se que mesmo com os valores das resistências reduzidas, as deformações dos concretos com resíduo de borracha de pneu foram maiores que a mistura referência, mostrando que esse material polimérico pode suportar deformações sob carregamento.

8.5 PLACAS DE CONCRETO LEVE

A Tabela 10 mostra os resultados dos pesos das placas 20x40 cm moldadas. Foi feita também uma análise visual desse elemento após a implementação do resíduo de borracha de pneu na mistura.

Tabela 10 - Pesos das placas de concreto

Placa (20x40cm)	Peso (kg)	(%)
Concreto referência	6,900	-
Concreto com 1% de resíduo de borracha de pneu	7,100	Aumento de 2,9
Concreto com 2,5% de resíduo de borracha de pneu	6,650	Redução de 3,6
Concreto com 5% de resíduo de borracha de pneu	6,600	Redução de 4,3

Fonte: O Autor (2019)

As placas diminuíram de peso conforme adicionava as porcentagens do resíduo de borracha de pneu. Com exceção da placa referente a 1%, esse valor mostrado ficou incoerente com as demais misturas, o mesmo pode ter sido causado por algum problema no momento da moldagem.

Em relação à análise visual, a incorporação do resíduo de borracha de pneu na mistura não apresenta nenhum aspecto irregular ao concreto.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa foi possível produzir concretos leves utilizando dois tipos de granulometrias de argila expandida, a C1506 e a C2215, e concretos leves de argila expandida com substituição parcial do agregado miúdo natural por 1, 2.5 e 5% de resíduo de borracha de pneu.

O concreto referência mostrou menor absorção de água e maior massa específica. Foi verificado que quanto maior a incorporação de resíduo de borracha de pneu no concreto, maior era a absorção de água por imersão e menor era a sua massa específica.

Com os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, verificou-se que quanto maior a incorporação de resíduo de borracha no concreto resultava na diminuição das resistências mecânicas.

Os resultados do módulo de elasticidade do concreto referência mostraram que o mesmo se apresenta como um material mais rígido se comparado com as demais misturas com 1, 2,5 e 5% de resíduo de borracha de pneu.

As misturas com resíduo de borracha mostraram uma deformação pós-pico, sem ruptura brusca como aconteceu com o concreto referência, devido à borracha ser um material polimérico com comportamento dúctil.

Com esses dados, o uso do resíduo de borracha, em substituição parcial do agregado miúdo natural provoca mudanças de comportamento no concreto, porém, mesmo com os valores reduzidos de resistência em relação ao concreto referência, seu emprego seria viável, podendo ser aplicado para fins não estruturais, sendo uma alternativa viável em relação ao ponto de vista ambiental e quanto ao desempenho sustentável e econômico, além de oferecer uma forma de aproveitamento para este tipo de resíduo.

9.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar outras porcentagens de argila expandidas;
- Usar outras graduações de resíduo de borracha e também em forma de filamentos;

- Realizar outros ensaios como conforto térmico acústico, resistência à flexão, durabilidade do concreto e resistência ao choque térmico.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Cimento Portland: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (nº200). Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606**: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete**. ACI 211.2, 2004.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for structural lightweight aggregate concrete**. ACI 213R. USA, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete**. ASTM C 330 – 77. Philadelphia, 1991.

ACCETTI, K. M.; PINHEIRO, I. M. **Tipos de fibras e propriedades do concreto com fibras**. In: 42º. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Fortaleza, 2000.

AKASAKI, J. L.; FIORITI, C. F.; NIRSCHL, G. C. **Análise experimental da resistência a compressão do concreto com adição de fibras de borracha vulcanizada**. 43º. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Foz do Iguaçu, 2016.

ALMEIDA, V. G. O. **Caracterização física e mecânica a altas temperaturas de concretos refratários reforçados com fibras de aço**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural – Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas. Limeira/SP, 2014.

ANGELIN, A. F. **Análise dos desempenhos físicos, mecânicos, térmico acústico da microestrutura do concreto leve autoadensável emborrachado (clae)**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia. Limeira/SP, 2018.

ANGELIN, A. F.; GACHET-BARBOSA, L. A. **Desempenho do concreto leve auto adensável: influência da adição do resíduo de recauchutagem de pneus**. In: Workshop da Pós-Graduação da Faculdade de Tecnologia de São Paulo. Limeira/SP, 2016.

ANIP. Associação Nacional das Indústrias Pneumáticas. São Paulo. **Ecopontos**. Disponível em: <<http://www.anip.com.br>>. Acessado em: 15 jul. 2018.

ANIP. Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. São Paulo. **História do pneu**. Disponível em <www.reciclanip.org.br> Acessado em: 09 set. 2018.

AZMI, N. J.; MOHAMMED, B. S.; AL-MATTARNEH, H. M. A. **Engineering properties of concrete containing recycled tire rubber**. International Conference on Construction and Building Technology, Kuala Lumpur, Malaysia on 16-20 June 2008.

BARBOZA, A. S. R; SANTOS, A. C.; GOMES, P. C. C.; LIMA, F. B. **Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneus para aplicação em elementos pré-moldados**. I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável. X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo, 2004.

BOAVENTURA, C. M. **Avaliação da resistência à compressão de concretos produzidos com resíduos de pneus**. Trabalho de conclusão de curso (monografia). Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana/ Ba, 2011.

BOGAS, J. A.; GOMES, A.; PEREIRA, M. F. C. **Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate**. Construction and Building Materials, p. 1013-1022, 2012.

BRAVO, R. S. **Análise de blocos de concreto com resíduo de borracha de pneu e metacaulim**. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira. São Paulo, 2014.

BUILDING PROFILE. **Australia Square na icon reborn**. Disponível em: <<https://australiasquare.mybuildings.com/Core/Content/Buildingprofile/Content3337.aspx>> Acessado em: 31 mar. 2019.

CABRAL, G. L. L. **Metodologia de produção e emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação**. Dissertação (Mestrado) – Ciências em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

CINEXPAN. **Argila expandida**. Disponível em: <<https://www.cinexpan.com.br/argila-expandida-cinexpan.html>> Acessado em: 08 jan. 2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 416**, de 30 de setembro de 2009.

CONCRETO & CONSTRUÇÕES. **Pré-fabricados de concreto: rapidez, economia e sustentabilidade na construção**. Revista Concreto. ISSN 1809-7197, n.43, 2006.

EUROLIGHTCON. Project BE96-3942/R2. LWAC Material Properties, State-of-the-Art. 111p. 1998. (<http://www.sintef.no>).

EVANGELISTA, A. C. J.; SHEHATA, L. C. D.; ALMEIDA, I. R. **Características mecânicas de concretos leves de alta resistência com argila expandida, produzidos no Brasil**. In: International Congress On High-Performance Concrete, and Performance and quality of concrete structures. Florianópolis, 1996.

FILHO, C. V. G. **Levantamento do potencial de resíduos de borracha no brasil e avaliação de sua utilização na indústria da construção civil**. Dissertação (Mestrado em tecnologia). Instituto de Engenharia do Paraná. Curitiba, 2007.

FIORITI, C. F.; AKASAKI, J.R. **Fabricação de blocos estruturais de concreto com resíduos de borracha de pneus**. Holos, v.4, n.2, 2004.

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre, v.7, n.4, p. 43-54, 2007.

FREITAS, C. **Estudo do desempenho mecânico de concreto com adição de partículas de borracha para aplicação como material de reparo em superfícies hidráulicas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

FREITAS, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; GALVÃO, J. C. A.; FILHO, C. V. G.; FERREIRA, E. S. **Desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus**. Química Nova, v.32, n.4, 2009.

GIACOBBE, S.; FIGUEIREDO, A. D. **Concreto de cimento Portland com borracha de pneus**. Boletim técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

GOMES, D. P. N. **Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura-Estudo de caso**. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.

HOLM, T. A.; BREMNER, T. W. **State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine enviroNBRents**. US Army Corps of Engineers – Engineer Research in Development Center, ERDC/SL TR-00-3, 2000.

JÚNIOR, F. A. S.; MARTINELLI, A. E. **Análise das propriedades do agregado miúdo: resíduo de borracha de pneu para compósitos cimentícios**. 21º CBECIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Mato Grosso, 2014.

KAMIMURA, E. **Potencial de utilização dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

KANSO, Mustafá Ali. **Maior aterro do mundo possui 7 milhões de pneus e pode ser visto do espaço**. 2014. Disponível em: <<http://hypescience.com>> Acesso em: 17 set. 2018.

LACUZIO, A. **O Panteão Romano**. Janela Itália. 08/03/2015. Disponível em: <<http://www.janelaitalia.com/o-panteao-romano/>> Acessado em: 15 dez. 2018.

LAGARINHOS, C. A. F. **Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental por meio da logística reversa**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, 2011.

LANZON, M. et al. **Microstructural examination and potential application of rendering mortars made of tire rubber and expanded polystyrene wastes**. Construction and Building Materials, v. 94, p. 817–825, 2015.

MARQUES, A. C.; AKASAKI, J. L.; FRIORITI, C. F. **Análise da resistência mecânica do concreto adicionado de borracha de pneu submetido à elevada temperatura**. Revista Tópos, v.6, n.1, Campinas, SP, 2012.

MARTINS, I. R. F. **Concreto de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2005.

MAVROULIDOY, M.; FIGUEIREDO, J. **Discarded tyre rubber as concrete aggregate: a possible outlet for used tyres**. Global NEST Journal, London, v. 12, n. 4, p. 359-367, 2010.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1ª ed. São Paulo: Pini, 1994.

MENEGUINI, E. C. A. **Comportamento de argamassas com emprego de pó de borracha**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2003.

MÖDERLER C. D. W. **1845: Patenteado o primeiro pneu**. Disponível em: <<http://www.dw.de/dw/article/a-686295.html>> Acesso em: 09 set. 2018.

MORAVIA, W. G. **Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade do concreto leve produzido com argila expandida**. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. 2ª Ed. São Paulo. Editora Pini, 1997.

NIRSCHL, G. C.; AKASAKI, J. L.; FIORITI, C. F. **Estudo de dosagens de concreto contendo fibras de borracha vulcanizada, provenientes da indústria da recauchutagem de pneus**. In: V CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, Juiz de Fora, 2002.

PARTALA, T. **Propriedades de concretos produzidos com rejeito particulado de borracha em substituição parcial do agregado miúdo.** Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais). Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2009.

PCZIECZEK, A. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis.** Dissertação (Mestre em Engenharia Civil). Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2017.

PEREIRA, M. G. F. **Potencial de utilização de agregados leves na produção de concretos estruturais.** Trabalho de conclusão de curso (monografia). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2012.

PRANDI, J. **Oakland Bay Bridge – San Francisco.** Mega Engenharia. 2016. Disponível em: < <https://megaengenharia.blogspot.com/2012/07/oakland-bay-bridge-san-francisco.html> > Acessado em: 20 dez. 2018.

QUEIROZ, I. C. C. **Análise das propriedades do concreto com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de borracha de pneus para aplicação em paredes de concreto.** Trabalho de conclusão de curso (Monografia). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2018.

RIBEIRO, C. M. C. **Gerenciamento de pneus inservíveis: coleta e destinação final.** Dissertação de Mestrado, Centro Universitário SENAC. São Paulo, 2005.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – Dosagem, produção, propriedades e microestrutura.** Tese (Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações.** 1ª ed. São Paulo: Pini, 2009.

RUFFO, G. H. **A história do pneu: da roda de madeira ao pneu hi-tech sem ar.** Revista Quatro Rodas, número 549. Editora Abril, São Paulo, 2009.

SALES, A. T. C.; MENDES, J. S. S. **Argamassas com agregado miúdo de resíduos de recauchutagem de pneus.** Anais SIMTEC. v. 1, n.1. Aracaju/SE, 2013.

SALINI, R. B. **Utilização de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000.

SANTOS, A. C. **Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneu com aplicação em placas pré-moldadas.** Dissertação (Mestre em Engenharia Civil). Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2005.

SANTOS, S. V.; BORJA, E. V. **Avaliação das propriedades mecânicas de blocos intertravados com resíduo de pneu reciclado**. Holos, v.3, 2007.

SANTOS, M. E. **Argila expandida como agregado para concreto leve**. Tema livre – Apresentado à reunião anual do IBRACON de 1986.

SCOBAR, R. L. **Concreto leve estrutural: substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil). Universidade Tecnológica do Paraná. Campo Mourão, 2016.

SHORT, A. e KINNIBURGH, W. **Lighthweight Concrete**. 1.ed. London: C.R. Books Limited, 1963.

SILVA, F. M.; BARBOSA, L. A. G.; LINTZ, R. C. C.; JACINTHO, A. E. **Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber**. Construction and Building Materials, v. 91, 2015.

SILVA, M. D. **Estudo comparativo entre a utilização dos concretos convencional e leve nos elementos horizontais das estruturas de edifícios**. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2003.

SOUZA, F. A. **Utilização de pneus pós-consumo como combustível em fornos de cimento**. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS. Anais... São Paulo: SMA, 2000.

TOPÇU, I. B., E VASCULAR, N. **Analysis of Rubberized Concrete as a Composite Material**. Cemente and Concrete Reseach. USA, 1997.

TOUTANJI, H. A.. **The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates**. Cement and Concrete Composites, Barking, v.18, n.2, 1996.

VARGAS, V. C. **Concreto leve: Estudo de dosagem substituindo o agregado graúdo convencional pela argila expandida**. Trabalho de conclusão de curso (monografia). Universidade Alto Vale do Rio do Peixe. Caçador, 2018.

VASCONCELOS, A. R. B. **Análise experimental da durabilidade de concretos de alto desempenho com adição de resíduo de borracha de pneu e cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, UNESPE. Ilha Solteira/SP, 2009.

VASCONCELOS, Y. **O que foi o Coliseu de Roma?**. Super Interessante. 18/04/2011. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/o-que-foi-o-coliseu-de-roma/>> Acessado em: 15 dez. 2018.

WALPOLE, R.E.; MYERS R.H.,2009, **Probability and statistics for engineering and science**. 2a ed. São Paulo, Pearson Education (in Portuguese).