

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

CONCRETO COM RESÍDUOS DE PNEUS PARA APLICAÇÃO EM
MEIO FIO

MANOEL RODRIGUES GOMES JUNIOR

BELÉM – PARÁ - BRASIL

2020

CONCRETO COM RESÍDUOS DE PNEUS PARA APLICAÇÃO EM MEIO FIO

Manoel Rodrigues Gomes Junior

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais - Mestrado Profissional, PPGEMAT/IFPA, do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA/Campus Belém, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Caracterização
Processamento e Aplicação de Materiais.

Linha de Pesquisa: Materiais não metálicos

Orientador: Dr. Laércio Gouvêa Gomes

BELÉM – PARÁ - BRASIL

2020

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
PARÁ**

CAMPUS BELÉM

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CONCRETO COM RESÍDUOS DE PNEUS PARA APLICAÇÃO EM
MEIO FIO**

Autor: Manoel Rodrigues Gomes Junior

Orientador: Laércio Gouvêa Gomes

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo _____ esta
Dissertação:

Prof. Dr. Laércio Gouvêa Gomes
(PPGEMAT/IFPA – Orientador)

Prof. Dr. Jaime Henrique Barbosa da Costa
(PPGEMAT/IFPA – Membro Interno)

Prof. Dr. Alessandro de Castro Corrêa
(PPGEMAT/IFPA – Membro Externo)

Profª Drª Andrielli Moraes de Oliveira
(PPG-GECON/UFG – Membro Externo)

Belém (PA), ____ de _____ de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais que investiram seu tempo e suas vidas na minha educação acreditando em meu conhecimento e me dando toda força, carinho e atenção ao longo de minha vida.

Obrigado, Marcia Maine Rodrigues, minha namorada, por todo o apoio, dedicação e incentivo dado aos meus estudos e acima de tudo por acreditar mesmo nos momentos mais difíceis.

Obrigado ao Amigo, Roger Wellington, meus braços e pernas nessa pesquisa, que esteve comigo em toda a parte prática da pesquisa, e os resultados presentes neste trabalho não existiriam sem sua ajuda, esforço e dedicação.

Obrigado aos Amigos de Curso, Wagner Roberto e Welton Raiol que me apoiaram, ensinaram, e ajudaram em todo o processo de desenvolvimento deste trabalho e nunca deixaram de me estender as mãos.

Agradeço ao meu orientador Dra. Laércio Gouvêa Gomes, por ter aceitado o desafio e dar todo apoio e não ter desistido em momento algum de me ajudar nessa pesquisa.

Obrigado ao Prof. Msc. José Guilherme por ter sido meu mentor e consultor vitalício, por acreditar em meu trabalho e ter ensinado como ser um bom aluno e professor.

Por fim, agradeço ao IFPA - PPGMAT, instituição que me acolheu como discente e docente, a qual tenho todo o respeito e admiração pelo excelente trabalho e empenho com a educação, disseminando conhecimento e ensinando uma educação humana, transformando pessoas em cidadãos sábios, de caráter e respeito.

“A vitalidade é demonstrada não apenas pela persistência, mas pela capacidade de começar de novo”

(Francis Scott Key Fitzgerald)

RESUMO

Os pneus descartados após sua utilização é um dos principais problemas ambientais e de saúde pública da atualidade, tem um longo tempo para se decompor, constituem grandes volumes e funcionam como pontos de armazenamento de água, promovendo a proliferação de vetores de doenças nos humanos. A indústria de recauchutagem de pneus vem se destacando no cenário mundial como uma das alternativas para minimizar este passivo ambiental, prolongando a vida útil dos pneus e atuando como uma alternativa de reaproveitamento de materiais, entretanto, o volume de resíduos gerados no processo ainda é muito questionado ambientalmente. Neste sentido, o presente trabalho visa produzir concreto com resíduos de pneus do processo de recauchutagem para aplicação em elemento de drenagem (meio-fio) substituindo parcialmente em massa o agregado miúdo (5% e 7%) por resíduos de pneus. Foram realizados procedimentos experimentais como caracterização física dos resíduos e materiais que compõem o concreto produzido; ensaios físicos e mecânicos de compressão axial e tração na flexão. Os resultados mostram que a melhor composição a ser utilizada é com 5% de resíduos, pois sua resistência à compressão axial (22,72 MPa) e tração na flexão (4,81 MPa) apresentou melhores resultados. Mesmo assim, todas as composições analisadas as resistências mecânicas decrescerão proporcionalmente a quantidade de material residual contido no concreto, como o a amostra com 7% de incorporação de resíduos de pneus que apresentou melhora na tenacidade à fratura. Pode-se concluir que o uso dos resíduos de recauchutagem para a produção de elementos pré-fabricados de concreto não estrutural é viável tecnicamente e ambientalmente correto, sendo possível outras aplicações desta tecnologia na produção de peças semelhantes.

Palavras Chave: Meio fio, recauchutagem de pneus, concreto.

ABSTRACT

The tires discarded after use is one of the main environmental and public health problems of today, has a long time to decompose, constitute large volumes and function as water storage points, promoting the proliferation of vectors of diseases in humans. The tire retreading industry has been standing out on the world stage as one of the alternatives to minimize this environmental liability, prolonging the life of tires and acting as an alternative for reusing materials, however, the volume of waste generated in the process is still much environmentally questioned. In this sense, the present work aims to produce concrete with tire residues from the retreading process for application in drainage element (curb) partially replacing the kid's aggregate (5% and 7%) tire residues. Experimental procedures were performed as a physical characterization of the residues and materials that make up the concrete produced; axial compression and traction in flexion. The results show that the best composition to be used is with 5% of residues, because its resistance to axial compression (22.72 MPa) and traction in flexion (4.81 MPa) presented better results. Even so, all the compositions analyzed will decrease the mechanical resistances proportionally will decrease the amount of residual material contained in the concrete, such as the sample with 7% of the incorporation of tire residues that showed an improvement in tenacity to the Fracture. It can be concluded that the use of retreading residues for the production of prefabricated elements of non-structural concrete is technically and environmentally friendly, and other applications of this technology are possible in the production of similar parts.

Keywords: Curb, retread tires, concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do pneu comercializado no Brasil	13
Figura 2 - Descarte irregular de pneus	14
Figura 3 - Constituição o pneu	21
Figura 4 - Ciclo do Pneu	29
Figura 5 - Processo de Recapagem de Pneus	32
Figura 6 - Processo de Remoldagem do Pneu	33
Figura 7- Processo de Recauchutagem de Pneus.....	35
Figura 8 - Modulo de elasticidade secante em função do tipo de borracha de pneu	42
Figura 9 - Processo de obtenção dos resíduos	445
Figura 10 - Aspecto visual do agregado miúdo utilizado	46
Figura 11 - Aspecto visual do agregado graúdo em natura utilizado	46
Figura 12 - Especificações do Meio-Fio	50
Figura 13 – Fabricação e identificação dos Corpos de Prova	51
Figura 14 - Cura úmida dos blocos de meio fio de concreto.....	52
Figura 15 – Meio-fio Pré-fabricado com diferentes traços	52
Figura 16 – Esquema para realização do <i>slump test</i>	53
Figura 17 - Prensa hidraulica para ensaios de compressão axial.....	54
Figura 18 - Ensaio de abatimento do concreto de referência	556
Figura 19 - Curva de distrieuição granulométrica (Areia)	58
Figura 20 – Curva de distribuição granulométrica (Seixo)	59
Figura 21 – Curva de distribuição granulométrica (Borracha).....	59
Figura 22 – Resultados do ensaio à compressão axial	63
Figura 23 – Resultados do ensaio à compressão axial aos 21 dias	63
Figura 24 – Resultados do ensaio à compressão axial aos 28 dias	64
Figura 25 – Ganho de Resistência (MPa) durante as idades do concreto (CP-R).....	63
Figura 26 – Ganho de Resistência (MPa) durante as idades do concreto (CP-5%)	63
Figura 27 – Ganho de Resistência (MPa) durante as idades do concreto (CP-7%)	64
Figura 28 – Comparativo CPs após o rompimento.....	65
Figura 29 – Resultados do ensaio de tração na flexão aos 14 dias	66
Figura 30 – Resultados do ensaio de tração na flexão aos 21 dias	66
Figura 31 - Resultados do ensaio de tração na flexão aos 28 dias.....	67
Figura 32 - Carregamento x idade, Ensaio de Tração na Flexão.....	67
Figura 33 - Carregamento x idade, Ensaio de Tração na Flexão.....	68
Figura 34 - Carregamento x idade, Ensaio de Tração na Flexão.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP = Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI = *American Concrete Institute*

ANIP = Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos

ASTM = *American Society for Testing and Materials*

CONAMA = Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP = Cimento Portland

DENATRAN = Departamento Nacional de Trânsito

COSANPA = Companhia de Saneamento de Pará

$D_{\text{máx}}$ = Diâmetro Máximo

EDS = Espectroscopia de Dispersão de Energia

f_{ck} = Resistência Característica do Concreto

f_{ckj28} = Resistência Característica do Concreto aos 28 dias

GPa = Giga pascal

Kg = Quilograma

K_{ic} = Fator Crítico de Intensidade de Tensão

MEV = Microscópio Eletrônico de Varredura

MF = Módulo de Finura

Mpa = Mega Pascal

NBR = Norma Brasileira Regulamentadora

NM = Norma Mercosul

Slump = Ensaio de Abatimento de Concreto

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades nominais da borracha de Pneu (Adaptado).....	39
Tabela 2 - Consumo de materiais para 1m ³ de concreto	50
Tabela 3 - Analise granulométrica do agregado miúdo	556
Tabela 4 - Análise granulométrica do Resíduo de borracha	57
Tabela 5 - Analise granulométrica do agregado graúdo	57
Tabela 6 - Relação de massa específica dos agregados	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA.....	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 BREVE HISTÓRICO DO PNEU.....	18
2.2 O PNEU	19
2.3 PRODUÇÃO E DESTINAÇÃO DOS PNEUS NO BRASIL	21
2.3.1 Resíduos inservíveis	23
2.3.2 Impacto ambiental	23
2.3.3 Legislação ambiental	25
2.3.4 Logística reversa dos pneumáticos	28
2.3.4.1 Redução de consumo e reaproveitamento de pneus.....	30
2.3.5 Reforma dos pneus	31
2.3.6 Resíduo de borracha de recauchutagem de pneu como agregado para concreto	35
2.3.7 Concreto	36
2.3.8 Concreto com adição de resíduos de borracha de pneu	36
2.3.8.1 Aplicações na engenharia	36
2.3.9 Propriedades do concreto com adição de borracha de pneu	38
2.3.9.1 Massa específica.....	40
2.3.9.2 Resistência à compressão	40
2.3.9.3 Resistência à tração	41
2.3.9.4 Propriedades elásticas.....	42
3 MATERIAIS E METODOS	44
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	44
3.2 MATERIAIS	44
3.2.1 Resíduo de borracha de pneus	44
3.2.2 Agregado miúdo	45
3.2.3 Agregado graúdo	46

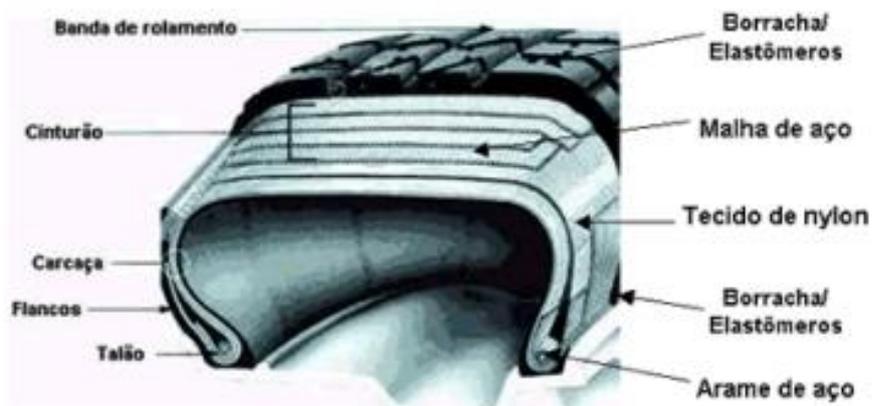
3.2.4 Cimento.....	47
3.2.5 Água.....	47
3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	47
3.3.1 Caracterização dos materiais.....	47
3.3.1.1 Granulometria do agregado graúdo, agregado miúdo e resíduos de borracha....	47
3.3.1.2 Caracterização do agregado miúdo	47
3.3.1.3 Caracteriação do agregado graúdo	488
3.3.1.4 Caracterização do resíduo de borracha.....	48
3.3.2 Determinação da dosagem	49
3.3.3 Fabricação do concreto	50
3.3.4 Slump test	52
3.3.5 Ensaios físicos e mecânicos.....	53
3.3.5.1 Ensaio de compressão axial simples	53
3.3.5.2 Ensaios de resistência à tração na flexão.....	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1 <i>SLUMP TEST</i>	55
4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	56
4.3 MASSA UNITÁRIA E ESPECÍFICA.....	600
4.4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	65
4.5 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	65
4.6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
5 CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos a invenção do pneu tem sua origem conhecida no século XIX, na época muitos empresários foram levados à falência devido seu produto se apresentar apenas uma goma “grudenta” para impermeabilizar tecidos ou o risco que a borracha tinha de dissolver quando fazia calor. Com as técnicas e tecnologias avançando na indústria de automóveis, experimentos iniciados pelo americano Charles Goodyear, por volta de 1830, confirmaram acidentalmente que a borracha cozida a altas temperaturas com enxofre, tornava possível a permanência das condições de elasticidade no frio ou no calor, a esse processo deu-se o nome de vulcanização da borracha que, além de dar forma ao pneu, aumentou a segurança nas freadas e diminuiu as trepidações nos carros.

Desde sua criação de fato houve muitas etapas de aprimoramento até chegar ao ponto da tecnologia de pneus que conhecemos hoje, portanto da criação ao desenvolvimento das indústrias de pneumáticos nota-se uma intensificação da circulação de bens e pessoas, no Brasil esse fato é observado uma vez que a essa indústria é fundamental para o modal rodoviário, sistema de transporte de maior utilização no país. A figura 1 mostra um pneu comum comercializado no Brasil e mostra as diversas partes da estrutura de um pneu.

Figura 1 - Estrutura do pneu comercializado no Brasil



Fonte: Andrietta (2002)

O Grande problema encontra-se no fato que resíduos de pneus possuem difícil eliminação, pois não são biodegradáveis e como tem grande volume tanto seu transporte como armazenamento são impraticáveis, logo acabam sendo dispostos na natureza de maneira inadequada, gerando graves problemas ambientais e de saúde pública. Com o

descarte irregular destes produtos pneumáticos na natureza, problemas ambientais e doenças são comumente associados a esse fato, dentre eles a poluição visual das pilhas de pneus dispostas a céu aberto, riscos de insegurança hídrica associados àquelas que se formam no leito de rios, e como esse material fica exposto a possíveis queimas acidentais, substâncias tóxicas são liberadas no ar. Mas a principal preocupação ainda se deve ao fato de pneus descartados de maneira irregular servirem como palco para reprodução de vetores de doenças “endêmicas” como a dengue, sobretudo na região amazônica devido ao seu clima equatorial. A figura 2 mostra um cenário comum de descarte de pneus no Brasil.

Figura 2 - Descarte irregular de pneus



Fonte: Disponível em: <https://www.gazetasaomateus.com.br/pneus-jogados-ao-ar-livre-podem-provocar-dengue-nas-proximidades-ceu-alto-alegre/>. Acesso em 07/01/2020

Devido a todos os problemas apresentados com o descarte irregular de pneus o País passou a criar leis e estratégias para a implantação de uma logística reversa na indústria de pneumáticos, com a finalidade de destinar corretamente pneus inservíveis seja para a reciclagem ou para a criação e aprimoramento de novos materiais. A Resolução nº 258 do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA (1999), deliberou a responsabilidade de destinação final do montante descartado às empresas fabricantes e determinou que para cada novo pneu introduzido ao mercado é obrigação da mesma dar uma destinação correta a um pneu inservível. Já o relatório CONAMA 2018 visa atender ao disposto no Art. 16 da Resolução Conama nº 416, de 30 de setembro de 2009, que dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada. A referida resolução determina aos fabricantes e importadores de pneus novos, com peso unitário superior a dois quilos,

a coletarem e destinarem adequadamente os pneus inservíveis existentes no território nacional. Além disso, estabelece a implantação de pontos de coleta de pneus inservíveis em todos os municípios com população superior a cem mil habitantes. Segundo o mesmo relatório só no ano de 2017, foram cadastrados 1.718 pontos de coleta, de acordo com a revista FAPESPE (2016), 1008 pontos de coleta haviam sido criados desde a criação da lei, ou seja, houve um aumento significativo de pontos de coleta nos últimos anos, isso mostra uma maior preocupação ecológica com o descarte desse material bem como corresponde a um aumento do volume de resíduo coletado, dessa forma é necessário de criação de desenvolvimento de novas maneiras de utilização desse resíduo.

Segundo Yunping et. al. (2004), a reciclagem de resíduo sólidos na forma de agregados para concreto tais como partículas de borracha de pneus, é uma das soluções capazes de diminuir o volume de resíduo do meio ambiente e amenizar os problemas causados pelo descarte irregular desses materiais. O concreto com resíduo de borracha é um material que possui características únicas com potencial para uso em várias aplicações.

Segundo o Trabalho de Teuka (1999), as primeiras experimentações feitas com o resíduo da borracha foram feitas no Estados Unidos em 1971, seguido de Reino Unido e Japão.

A Pesquisa feita por Fioriti, Ino e Akasaki (2007) avaliaram a incorporação de resíduos de borracha, provenientes do processo de recauchutagem de pneus, em peças de concreto de pavimentação intertravada. A borracha incorporou o concreto como forma de adição em proporções de 8%, 10% e 12% em volume. Segundo eles, de acordo com os resultados de resistência a compressão, nenhuma amostra obteve a resistência de 35 MPa prescrita na NBR 9781 (ANBT, 1997). Houve uma significativa redução na resistência das amostras que tinham o resíduo incorporado.

A utilização de resíduos de pneus recauchutados como alternativa ambiental e matéria prima para processos da construção civil demonstra cada vez mais ser uma alternativa viável para ambos os setores uma vez que diminui o volume desse resíduo na natureza reduzindo seu impacto ambiental e adiciona propriedades interessantes ao concreto sem causar danos indesejados às peças fabricadas, uma vez que essas não possuem caráter estrutural. Ainda assim é necessário aprofundamento acerca da viabilidade técnica e econômica da fabricação de pré-moldados não estruturais de concreto adicionado de resíduo de borracha de recauchutagem, o foco deste trabalho é estudar a viabilidade da substituição em massa do agregado miúdo em proporções de 5%

e 7% afim de analisar a configuração da resistência e densidade das amostras a fabricação de bordas de passeio com concreto com resíduo de borracha.

1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo o Departamento Nacional de Trânsito – DENATRAN, no relatório mensal da frota de veículos no país no mês de outubro de 2019, a frota de veículos brasileira é composta por mais de 104 milhões, só de automóveis são mais de 56 milhões correspondendo a 54,10 % de toda a frota brasileira. Estimando-se que em torno de 30% desses carros trocam os pneus anualmente, seriam mais de 67 Milhões de pneus sem uma destinação adequada. O desafio da atual geração de pesquisadores é dar uma destinação ambientalmente correta e fazer o máximo reaproveitamento de pneus inservíveis, visto que este material não possui decomposição rápida e constitui elevado peso, quantidade e sobretudo volume, o que o torna um material com alta dificuldade de armazenamento, descarte inapropriado e reaproveitamento.

De acordo com o Relatório de Pneumáticos, 2018 da CONAMA somente no estado do Pará houve uma destinação de 7.609 pneus inservíveis no ano de 2017, isso constitui 1,3% da destinação nacional, ou seja, o estado do Pará encontra-se na 15ª posição dos estados com maior número de pneus inservíveis, e o 2º na região norte, e apenas uma empresa foi responsável pela coleta desse material no estado. As Unidades Federativas com maior volume de pneus descartados são os estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná.

De acordo como trabalho de Oda e Fernandes Júnior (2001), os pneus servem como local para a reprodução de vetores de doenças quando estes são abandonados em locais inapropriados, além disso representam um risco de incêndios e por consequência contaminam o ar com fumaça tóxica e os lençóis freáticos com óleo. Quando dispensados em aterro sanitário, os pneus inservíveis dificultam a compactação por conta do tipo de material em sua maioria de borracha, reduzindo a vida útil dos aterros. Outros meios para armazenagem deste material são a trituração e a raspagem que poderia melhorar a compactação nos aterros, mas tornaria o processo mais caro e por consequência inviável economicamente já que seriam descartados, mas se esse material for empregado em outras áreas da indústria sua viabilidade economia poderia ser garantida.

Visto toda a preocupação com o descarte inadequado de pneus inservíveis para a indústria automobilística, diversos estudos têm sido apresentados à comunidade científica com o intuito de dar uma correta destinação, aprimorando materiais e técnicas capazes de

diminuir o volume desses materiais na natureza e utiliza-los em diferentes industrias. Uma dessas industrias é a construção civil, que entre as principais aplicações tem mostrado eficiência na inserção de resíduos de borracha de pneus em elementos de concreto pré-fabricados não estruturais como pavers, piso tátil, canaletas, meio-fio, telhas entre outros. Embora a pesquisa com pneus esteja em alta, não se conhece de fato todas as aplicações possíveis que essa técnica se mostra tecnicamente viável, é necessário cada vez mais pesquisas que permitam avaliar a eficácia da aplicação de resíduos de borracha em concreto.

Com a possibilidade de inserção de resíduos inservíveis, que seriam descartados na natureza, no concreto e com o objetivo de melhorar as propriedades do compósito de concreto, o presente trabalho busca produzir e avaliar o concreto com resíduos de pneus de recauchutagem. Com base no que foi visto em trabalhos passados é possível notar que este novo material provavelmente terá sua resistência mecânica reduzida, será mais leve devido a densidade da borracha, também apresentará melhor conforto térmico e acústico, que não é o objetivo da pesquisa mas que são propriedades interessantes para os elementos fabricados, além de tudo melhora as propriedades de resistência a tenacidade e fratura visando a redução de custos para torna-lo ecologicamente correto, tecnicamente utilizável e economicamente viável.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

- Produzir blocos para borda de passeio em concreto com resíduo de borracha de recauchutagem, obtido a partir de material reciclado e utilizar como substituto parcial de agregado miúdo, visando sua aplicação na construção civil.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização física dos agregados;
- Propor uma dosagem adequada para produção do concreto com resíduo;
- Analisar a compressão axial e tração na flexão a partir de teste mecânicos;
- Verificar as características macroscópicas das amostras rompidas;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentado um breve estudo das literaturas consultadas para embasar o conhecimento acerca da história, evolução e tecnologia dos pneus.

2.1 BREVE HISTÓRICO DO PNEU

De acordo com o escrito na 34ª edição da revista PNEWS (2013), o pneu é considerado uma grande invenção tanto por sua influência sobre a movimentação de bens econômicos quanto pessoas. É importante compreender que desde a criação do pneu, este produto precisou de diversas etapas e experimentos, para que então em 1839 o norte americano Charles Goodyear, em uma de suas diversas experiências, descobriu o processo de vulcanização, onde a borracha submetida a altas temperaturas juntamente com enxofre, conseguiria manter as condições de elasticidade e resistência. No início quando acabara de ser descoberta a invenção, lembrava o pneu apenas na forma, pois ainda era um conjunto de tubos envolvidos numa substância em látex vulcanizada e recoberto por couro que inicialmente equipava carroças e as carruagens a vapor da época.

Quarenta anos depois do experimento de Goodyear, apresentava-se a segunda principal evolução do pneu, com o veterinário escocês John Boyd Dunlop, em 1888, que se utilizando dos pneus de borracha desenvolvidos por R. W. Thomson em 1845 e observando seu filho andar de triciclo com rodas de borracha vulcanizada, Dunlop resolveu substituir cada roda por uma câmara inflada de ar de borracha flexível, agora com mais leveza e resistência, coberta com uma lona, envolvendo um aro de madeira. Nesse momento estava descoberto o primeiro pneu com câmara de ar, e deu-se o início da primeira fabricante de pneus conhecida. (PNEWS, 2013).

Dado o pontapé inicial à indústria de fabricantes de pneus com a Dunlop, o nascimento e crescimento de diversas indústrias a fim de explorar o mercado automobilístico que se desenvolvia na época foi exponencial, o método foi sendo desenvolvido e melhorado, mas de maneira geral até os dias de hoje a vulcanização da borracha natural através do enxofre continua sendo o método mais largamente utilizado na indústria de pneus, embora centenas de melhorias tenham sido atribuídas.

A vulcanização é um processo pelo qual materiais elastômeros são preparados. Consiste na formação de uma rede molecular utilizando um produto químico que liga as macromoléculas entre si e que aumenta a força retrativa e reduz a formação permanente residual após a remoção de forças deformantes, aumentando a elasticidade e reduzindo a plasticidade. Esse sistema oferece aos artefatos de borracha propriedades iniciais excelentes, como alta tensão de ruptura, ótima resiliência, resistência à fadiga e abrasão, porém as propriedades de resistência ao envelhecimento térmico e relaxação de tensão são pouco satisfatórias. (CRIPA, B. H. S. da. et al., 2013)

Com a descoberta e o aprimoramento desses processos foram fundadas algumas das empresas conhecidas mundialmente no setor, são elas, Dunlop (1888), Michelin (1889), Goodyear (1898), Firestone (1900) e Bridgestone (1931). Essas empresas ajudaram a moldar o pneu com aperfeiçoamentos revolucionários, até chegar aos moldes do que se conhece atualmente.

2.2 O PNEU

Tecnicamente conhecido como pneumático, é basicamente um tubo de borracha cheio de ar que, ajustado ao aro de uma roda, permite a locomoção do veículo absorvendo os impactos com o solo e suavizando os impactos ao motorista. O pneumático é o principal responsável por suportar as cargas, assegurar a transmissão da potência automotriz, garantir dirigibilidade e respostas eficientes nas freadas e acelerações e contribuir, junto com as suspensões, para o conforto dos ocupantes (SINDIPNEUS, 2013).

Dentre os diferentes tipos de pneus existentes no mercado atual, eles podem ser classificados pela presença ou não de câmara de ar. Aqueles que não possuem câmara de ar interna, recebe em sua carcaça uma camada interna de borracha, chamada de liner, essa camada é responsável por manter e reter o ar no interior do pneu. Os pneus sem câmaras apresentam como principal vantagem o fator segurança, pois quando perfurados perdem o ar lentamente; além disso há o fato de apresentarem montagem e desmontagem mais rápida que os pneus que apresentam câmaras de ar (RAMOS, 2005).

De acordo com Brito (2013), “atualmente, os pneus são fabricados com vários componentes que lhes proporcionam características necessárias para o seu bom desempenho e segurança”. A maior parte dos pneus é feito com aproximadamente 10% de borracha natural, 30% de borracha sintética e 60% de aço e tecidos, que servem para fortalecer a estrutura do pneu (RAMOS, 2005). De acordo com PGIRPN (2011), os componentes utilizados para a fabricação da borracha necessária à produção de pneus têm uma mistura de borracha sintética, borracha natural, óleos, enxofre, óxido de zinco, e negro de fumo, entre outros componentes químicos.

O negro de fumo é responsável por deixar a borracha mais resistente e aumentar seu desempenho. Por meio da vulcanização, a borracha é misturada a esse produto num molde aquecido entre 120 a 170 °C, juntamente com o enxofre, compostos de zinco e outros aceleradores de processo. Por ser considerado difícil de reciclar, o negro de fumo

vem sendo substituído pela sílica na construção dos chamados “pneus ecológicos” (ANDRIETTA, 2002).

No início, os pneus eram feitos totalmente com borracha natural, obtida do látex proveniente de árvores e plantas, mas após a primeira guerra mundial, na Alemanha, surgiu a borracha sintética, produzida a partir de derivados do petróleo, porém como o material sintético é mais propenso à rachadura provocada pelo calor, os pneus são sempre constituídos de uma parcela de borracha natural. (BRITO, 2013)

A borracha natural fornece as propriedades elásticas, enquanto que a sintética proporciona a estabilidade térmica do pneumático. É usada como principal elastômero na indústria pneumática (pneus), tanto como 100% puras, quanto como misturas com borrachas sintéticas. (CRIPA, B. H. S. da. et al., 2013)

Segundo o BNDES (1998), os pneus para veículos de passeio são constituídos das seguintes partes:

- **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 no sentido diagonal, umas das outras nos pneus convencionais e radialmente nos pneus radiais. Nos pneus radiais é adicionada uma série de lonas, que cobrem a carcaça, denominada cintura, que estabilizam a carcaça radial. As lonas para pneus de carga (caminhões e ônibus) são sempre de aço. Os radiais possuem maior teor de borracha natural, que lhes proporciona, aliado aos reforços estruturais e novos desenhos da banda de rodagem, maior resistência, durabilidade, aderência e estabilidade que os convencionais. Em função disso, apesar de apresentar custo mais elevado, a tendência mundial é de somente serem usados os pneus radiais, eles representam 97% da produção mundial de pneus de passeio, e 45% de participação na produção de pneus de caminhão e ônibus (BNDES, 1998).
- **Talão:** possui a forma de um anel, sua finalidade é manter o pneu acoplado firmemente ao aro, impedindo o vazamento do ar e garantindo a segurança para que o pneu não solte do aro (destalonamento) quando submetido a esforços laterais. Internamente são constituídos de arames de aço de alta resistência unidos e recobertos por borracha.
- **Flancos:** constituem a parte lateral do pneu, a fim de proteger a carcaça contra os agentes externos. São constituídos por borrachas com alto grau de flexibilidade.

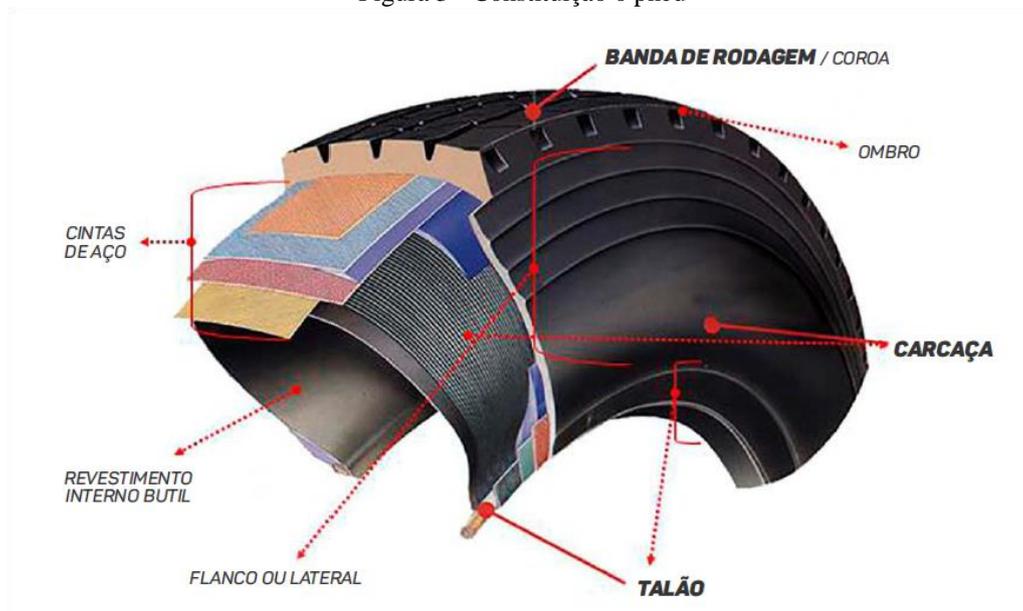
- **Banda de Rodagem:** é a parte do pneu que entra diretamente em contato com o solo. É feita por um composto de borracha com alta resistência ao desgaste, além disso, seus desenhos constituídos por partes cheias (biscoitos) e vazias (sulcos) proporcionam aderência, tração, estabilidade e segurança do veículo.

Segundo informações do site da empresa Brazil Tires (2017), o pneu também é constituído pelas partes descritas a seguir:

- **Ombros:** são as extremidades da banda de rodagem e os apoios necessários para a segurança em curvas e manobras.
- **Nervura central:** é a parte central da banda de rodagem, que tem contato circunferencial do pneu com o solo.

A figura 3 identifica as partes constituintes de um pneu.

Figura 3 - Constituição o pneu



Fonte: Disponível em: <http://www.recapagemampneus.com.br/nosso-processo>. Acesso em: 22/01/2020

2.3 PRODUÇÃO E DESTINAÇÃO DOS PNEUS NO BRASIL

Segundo o trabalho de Beumerink e Janssen (2001), o ciclo de vida do pneu consiste, basicamente, de cinco estágios: extração, produção, consumo, coleta dos pneus descartados e o gerenciamento da destinação do lixo.

No ano de 2019, segundo o site oficial da Dunlop, a empresa comemorou o número de 20 milhões de pneus produzidos no Brasil. Este número refere-se apenas a produção, mas é importante lembrar que existem no mínimo 5 empresas multinacionais do mesmo porte da Dunlop e que além da fabricação o Brasil é um grande importador deste material.

A avaliação do desempenho do setor de pneumáticos indica que o Brasil importou quase a mesma quantidade de pneus que exportou, o que explica uma insustentabilidade linear que culmina no acúmulo de pneus inservíveis no país. (GOMES, 2007).

Porém de acordo com a ANIP, em 2011 o Brasil exportou 17,4 milhões de pneus, contra 23,4 milhões importados, uma diferença significativa, que leva ao aumento do problema de pneus velhos.

Segundo Oda & Fernandes Júnior (2001), quando abandonados em locais inadequados, os pneus servem como local para procriação de mosquitos e outros vetores de doenças e representam um risco constante de incêndios que contaminam o ar com fumaça altamente tóxica e os lençóis freáticos com óleo. Além disso, a disposição de pneus em aterros sanitários é problemática, pois os pneus dificultam a compactação, reduzindo significativamente a vida útil dos aterros. Por outro lado, a trituração, que resolveria o problema da compactação, é um processo caro.

Calcula-se que são descartados mais de 35 milhões de pneus por ano, sendo estimado que cerca de 100 milhões de pneus já se encontram abandonados no meio ambiente (ARAÚJO NETO et. Al., 2006).

Reforça-se que a problemática de destinação adequada dos pneus no Brasil vem sendo estudada com preocupação e, embora ainda aquém do ideal, algumas medidas vêm sendo tomadas para evitar acúmulos e descartes incorretos.

Nesse ponto, foi criada a Reciclanip (entidade das fabricantes de pneus Bridgestone, Goodyear, Michelin, Pirelli, Continental e Dunlop) essas empresas são responsáveis pela coleta e pelo transporte dos pneus a partir destes locais até as empresas de trituração, quando necessário, de onde serão encaminhados para destinação final. Foram elaborados diversos acordos com as prefeituras municipais têm permitido a ampliação do número de pontos de coleta de pneus em todo o país. Isso se comprova no balanço anual do Programa de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis, que vêm apresentando anualmente resultados positivos.

O relatório anual CONAMA (2006), considera que os pneus usados devem ser preferencialmente reutilizados, reformados ou reciclados. A escolha do processo de reciclagem dependerá de inúmeros fatores, como os aspectos técnicos e econômicos ligados à natureza, volume e localização dos resíduos, entre outros.

Vale lembrar, que em alguns desses processos de destinação, ainda são gerados resíduos inservíveis, sendo considerados, deste modo, também um passivo ambiental.

Portanto, algumas tecnologias ambientalmente adequadas vêm sendo praticadas pelas empresas destinadoras e declaradas no Relatório de Pneumáticos em 2016.

2.3.1 Resíduos inservíveis

Diz-se que o pneu inservível é aquele que não pode mais ser utilizado ou mesmo reutilizado em veículos automotores. De uma maneira mais técnica, Novick e Martignoni (2000) dizem que o pneu se torna inservível devido o rompimento da lona, tornando-se fisicamente inaproveitável, também não podendo ser recauchutado.

Já segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) – NBR 10004 (2004), O pneu inservível, é classificado como “Resíduo não Perigoso-Inerte (Classe II-B) que por sua vez são quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. Mesmo assim, quando dispostos inadequadamente, constituem passivo ambiental, que podem resultar em sério risco ao meio ambiente e a saúde pública.

Visando reduzir o descarte desses resíduos, algumas aplicações vêm sendo feitas desde sua incorporação na construção civil até a fabricação de sapatos, de tapetes automotivos, em misturas asfálticas, adesivos, entre outros (BERTOLLO, 2000).

Além disso, segundo o Relatório de Pneumáticos de 2016, outras destinações vêm sendo postas em prática como alternativas para o descarte ambientalmente adequado, são elas:

- Coprocessamento: utilização dos pneus inservíveis em fornos de clínquer como substituto parcial de combustíveis e fonte de elementos metálicos;
- Laminação: processo de fabricação de artefatos de borracha;
- Granulação: fabricação de borracha moída, em diferente granulometria, com separação e aproveitamento do aço;
- Pirólise: decomposição térmica da borracha conduzida na ausência de oxigênio ou em condições em que a concentração de oxigênio é suficientemente baixa para não causar combustão, com geração de óleos, aço e negro de fumo.

2.3.2 Impacto ambiental

Os pneumáticos ocupam papel de destaque nas discussões sobre os impactos causados ao solo, o ar e a água. Quando utilizados, liberam fragmentos no ar que

provocam reações alérgicas nas pessoas. Apesar de o pneu ser um material inerte, que não contem metais pesados em sua composição e ser indissolúvel em água, o que evita o fenômeno da lixiviação (solubilização dos constituintes no lençol freático), possui peculiaridades que dificultam o seu descarte final, exigindo desta forma, um gerenciamento eficiente. (SILVA, 2018)

Ainda há a questão do descarte em aterros sanitários, como é feito com grande parte do lixo descartado, entretanto quando se trata de pneus de borracha, que por sua composição elástica e difícil compactação acabam por ocupar grande volume, logo torna inviável dar a este material essa destinação. “Não é recomendada a sua disposição em aterros sanitários devido a sua forma e composição, dificuldade de compactação, decomposição e redução na vida útil do aterro” (ODA e FERNANDES JÚNIOR, 2001).

Os pneumáticos podem reter ar e gases em seu interior, fazendo com que inflem (como um balão) e cheguem até a superfície do aterro, o que gera a quebra da camada de cobertura. Dessa forma, os resíduos ficam expostos novamente, atraindo insetos, roedores e pássaros. Ramos (2005) afirma que as consequências mais comuns de descartes inadequados de pneus são: o assoreamento dos rios e lagos, o risco de incêndio, a ocupação de grandes espaços em aterros e a proliferação de insetos que podem, inclusive, transmitir doenças graves. Além disso, PARRA et. Al. (2011) expõem que há o favorecimento da entrada de água das chuvas, o que produz uma quantidade maior de chorume.

Muitas vezes os pneus são jogados em córregos, lagos ou rios, o que provoca a diminuição da calha desses locais que conseqüentemente ficam mais passíveis a enchentes, causando inundações às vias e residências próximas. (CEMPRE, 2010).

Quando este material é disposto em terrenos a céu aberto, pode desencadear um grande problema ambiental, pois quando empilhados aumentam os riscos de incêndios, e, para cada pneu queimado, são liberados 10 litros de óleo, que podem contaminar o solo e o lençol freático, além de gases como carbono, dioxinas, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e outras substâncias também tóxicas e cancerígenas (RODRIGUES et al., 2004).

Devido aos problemas sanitários e ambientais causados pela destinação inadequada dos pneus inservíveis, esse assunto passou a ser motivo de regulamentação alcançando, inclusive, as indústrias de pneus. Neste contexto, surge uma legislação específica e abrangente, além da logística reversa da coleta e destinação dos pneumáticos inservíveis. (BRANCO et al., 2011).

2.3.3 Legislação ambiental

A preocupação mundial com a crise nos aterros sanitários culminou com a implantação de leis determinando a obrigatoriedade da reciclagem de resíduos. Na Califórnia, EUA, criou-se em 1989 um plano integrado de gerenciamento de resíduos aplicado à área de Engenharia, que obrigou os municípios daquele país a reduzirem seus depósitos de entulhos, e o seu departamento de transporte, a incluir o concreto reciclado nas especificações dos materiais para a pavimentação. A partir desta iniciativa, surgiram várias campanhas americanas voltadas para o uso de materiais reciclados juntamente com a matéria-prima. Entretanto, o uso de materiais recicláveis tem sido objeto de controvérsias, sendo destacada a importância da qualidade dos produtos gerados pela reciclagem (PIT & QUARRY, 1990).

Além disso, o uso de pneus inservíveis em obras de pavimentação vem sendo regulamentado em vários países, como nos Estados Unidos, que promulgaram a Lei 102-240 que obriga o estudo e a pesquisa da utilização da borracha de pneus em misturas asfálticas pelos departamentos de transporte e agências de proteção ambiental. Esta lei prevê a utilização de até 20% da borracha de pneus reciclada em asfalto, garantindo incentivos fiscais para sua adoção e a punição para os Estados que desrespeitarem a legislação (EPPS, 1994).

Nos Estados americanos o valor dessas taxas é de, aproximadamente, US\$ 0,50 e, na violação desta lei o infrator poderá ser multado em até US\$ 10.000, podendo até ser preso se isto ocorrer no Estado da Califórnia (IPT, 1995).

Os estados americanos, segundo LUND (1993), adotaram cinco princípios relacionados à gestão de resíduos sólidos, incluindo os pneus:

- 1) o princípio do “berço ao túmulo”; neste caso, o setor produtivo é responsável pelo seu produto, até o término do ciclo de vida;
- 2) o princípio da responsabilidade; onde o setor produtivo é responsável pelo custo da coleta e disposição final dos resíduos sólidos considerados recicláveis;
- 3) o princípio do direito de saber do cidadão; no qual todo cidadão tem direito de saber quais são os resíduos gerados no processo produtivo, assim como: onde e como é realizado o tratamento destes resíduos;
- 4) o princípio da corresponsabilidade; toda empresa de tratamento e disposição final de resíduos sólidos será corresponsável pelos resíduos ali tratados ou dispostos. Caso receba um determinado resíduo, quer seja doméstico ou industrial, deverá emitir um certificado de aceitação do mesmo. A finalidade desse certificado é controlar o setor

produtivo industrial, para verificar se o mesmo utiliza alguma matéria-prima em sua linha de produção que seja proibida nos EUA; e,

5) o princípio dos “três erres”; que tem por finalidade instrumentar a mudança de padrão de produção linear insustentável vivenciada pela indústria nacional, em um padrão circular sustentável. Para tal, deve reduzir, reusar e reciclar os resíduos sólidos, quer sejam domésticos, industriais ou hospitalares.

A Holanda, preocupada em reduzir a poluição ambiental provocada por entulhos da construção civil, promulgou uma lei obrigando os construtores a disporem os resíduos sólidos de forma eficiente e ambientalmente correta, garantindo, também, a reutilização dos resíduos como forma de reduzir o uso de depósitos. (GOMES, 2007)

Em 2002, uma comissão formada por estados membros da União Européia, divulgou uma proposta incluindo a implantação da coleta seletiva de pneus descartados de modo a atingir 100% da produção e estabelecer estratégias de prevenção que possibilite a redução de 5% da produção destes resíduos de borracha originária do pneu. A recauchutagem deveria atingir 25% dos pneus usados produzidos e a sua valorização deveria atingir 65% dos mesmos, ficando proibida a deposição destes em aterros. Em 2003, seria proibida a deposição de pneus inteiros em aterros e, a partir de 2006, qualquer forma de depósito de pneus ficaria proibida nos países da União Europeia (RESCHNER, 2002).

No Brasil, a geração, manuseio e reaproveitamento de resíduo são regulamentados por leis federais, estaduais e municipais que devem ser interpretadas conjuntamente, sendo fiscalizadas pelos órgãos governamentais FNMA, IBAMA e CONAMA. As normas ambientais estão previstas na ISO 14.000 e a disposição dos resíduos é regida pela NBR 10.004 (NBR 10004, 1987). (GOMES FILHO, 2007)

Todas estas legislações específicas devem ser:

- i. aplicadas e avaliadas no âmbito dos direitos do Estado e dos cidadãos;
- ii. previstas na Constituição Federal Brasileira; e,
- iii. relacionadas à saúde e ao meio ambiente, sendo obrigação dos Estados e Municípios a proteção ao meio ambiente e o combate à poluição em qualquer uma de suas formas.

No Brasil, a Resolução 235 (CONAMA, 1996) proibiu a importação de pneus remoldados com o objetivo de diminuir o volume de pneus inservíveis que se acumulavam nos aterros sanitários. Esta resolução está em consonância com as determinações anteriores que proibiam a importação de bens usados com o exposto na

Portaria SECEX nº 08/1991 do Departamento de Operações de Comércio Exterior, Portaria Interministerial nº 03/1995 do Ministério da Fazenda e Portaria SECEX nº 09/1991 da Secretaria de Comércio Exterior, que vetavam a importação de pneus usados e recauchutados.

Em 1998, com a publicação da Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro, ficaram regulamentadas penal e administrativamente, as punições relativas às condutas ou atividades nocivas ao meio ambiente. (GOMES, 2007)

Com a Resolução 258 (CONAMA, 1999), os fabricantes passaram a ser obrigados a efetuar o recolhimento dos pneus usados, porém essa resolução não citava a proibição de sua importação, anteriormente definida pela resolução 235. Por causa desta falha, a Secretaria de Comércio Exterior, por intermédio da Portaria SECEX nº. 02, de 08/03/2002, permitiu a importação de pneus remoldados dos países do Mercosul, favorecendo empresas estrangeiras em detrimento das nacionais. Com isto, diversas empresas continuaram a importação de pneus usados com base em liminares e mandados de segurança.

A partir dessa regulamentação, surgiram vários programas de reciclagem, com o intuito de aproveitar o resíduo como matéria-prima para diversas aplicações. A coleta de pneus passou a ser mais seletiva, sem o material recolhido depositado temporariamente em depósitos, aguardando a destinação final para reciclagem; entretanto, ainda não estão disponíveis dados atualizados sobre o seu descarte diário ou sua quantificação como reciclados diariamente. (GOMES FILHO, 2007)

A legislação vigente obrigou, a partir de 2005, que a reciclagem de pneus fosse superior à sua produção (RECICLOTECA, 2006). Feito o planejamento da destinação final dos pneus inservíveis, ficou a questão de qual seria o método mais adequado de reciclagem, lançando-se o desafio de se efetuar a reciclagem dos pneus inservíveis, reaproveitando-se todo seu conteúdo de materiais e potencial energético, sem agredir o meio ambiente ou trazer prejuízos para a saúde pública.

Além disso, os fabricantes e os importadores de pneus novos, de forma compartilhada ou isoladamente, devem implementar pontos de coleta de pneumáticos inservíveis, podendo envolver os pontos de comercialização de pneus, os municípios, borracheiros e outros. Além disso, os fabricantes e os importadores de pneus novos devem implantar nos municípios acima de 100.000 (cem mil) habitantes pontos de coleta e informar ao Ibama. No entanto, em 2017, foram cadastrados 1.718 pontos de coleta, sendo 925 localizados em municípios com população residente acima de 100 mil habitantes,

restando 12 municípios com esta característica sem nenhum ponto de coleta declarado. (Relatório de Pneumáticos, 2018 – Resolução Conama nº 416/2009)

O controle realizado pelo Ibama da aplicação da Resolução Conama nº 416/2009 tem viabilizado a coleta e a restituição dos pneumáticos usados e inservíveis ao setor empresarial, tanto para reaproveitamento em seu ciclo produtivo, quanto para outras destinações finais ambientalmente adequadas. Segundo o Relatório de Pneumáticos (2018), após as medidas de fiscalização, o cumprimento da meta de destinação nacional manteve-se superior a 90%. As empresas fabricantes e importadoras de pneus novos alcançaram 99,55% da meta de destinação de pneus prevista.

2.3.4 Logística reversa dos pneumáticos

Entende-se que a vida de um produto não termina com a entrega ao cliente, uma vez que os produtos se tornam obsoletos, danificados, ou deixam de funcionar, devendo retornar ao ponto de origem para serem adequadamente descartados, reparados, remanufaturados ou reaproveitados. Nesse aspecto, a logística reversa promove o retorno dos materiais ao ciclo produtivo e agrega valor ao produto. (GOTO e SOUZA, 2008)

Rogers e Tibben-Lembke (1998) definem a logística reversa como um processo de planejamento, implementação e controle do fluxo de matérias-primas, estoque em processo e produtos acabados, incluindo todo o fluxo de informação do ponto de consumo ao ponto de origem e com o objetivo de recuperar valor ou efetuar o descarte de forma adequada.

A figura 4 ilustra o fluxograma de produção e destinação dos pneus por meio da logística reversa.

Figura 4 - Ciclo do Pneu



Fonte: Adaptado de Reciclanip (2012)

A logística reversa ganhou importante destaque nas etapas do processo de gestão de resíduos sólidos, uma vez que esses materiais retornam em diferentes centros produtivos na forma de matéria-prima secundária. (GOTO e SOUZA, 2008).

A logística reversa contribui, assim, reduzindo o impacto ambiental ao longo da vida útil do pneu, pois reduz a fonte de produção de novos, estimula a reutilização, a substituição de produtos e a reciclagem de materiais, tudo isso desde o ponto de consumo até o ponto de origem do pneu.

Segundo Lagarinhos e Tenório (2008), quando os consumidores deixam os pneus nos distribuidores e revendedores após a troca ou nos ecopontos ou ecobases após o término da vida útil, é realizada uma triagem, na qual os pneus podem ser classificados em servíveis ou inservíveis.

Os pneus inservíveis são aqueles que não podem ser utilizados no processo de reforma, devido o estado da carcaça e da banda de rodagem, eles são enviados para o processo de pré-tratamento. Este processo consiste em várias operações, como: a separação da borracha, a separação do aço e as fibras têxteis. O produto final dependendo do destino é o pó-de-borracha ou lascas de pneus. Os processos mais utilizados para a trituração de pneus inservíveis são: o processo de trituração à temperatura ambiente e o processo criogênico.

Leite (2003), afirma que há dois pontos modificadores básicos da logística reversa: o primeiro, de origem ecológica, com manifestações dos mais diversos setores da sociedade (ONGs, associações, cidadãos, consumidores) e o segundo, de origem governamental, que se apresenta nas mais diferentes formas (normas, legislação, incentivos fiscais ou outros benefícios). Estes fatores influenciam algumas condições do fluxo dos materiais, alterando a forma como os produtos retornam ao mercado.

De acordo com o que foi publicado por Goto e Souza, (2008), empresas de vários segmentos econômicos estão engajadas em ações que visam a preservação do meio ambiente por meio da redução do desperdício, da reutilização do produto, da reciclagem de materiais, da incineração com aproveitamento de energia e da disposição de forma segura. No segmento de autopeças há grande preocupação com o impacto ambiental dos pneus que são descartados em locais inadequados, causando danos ao meio ambiente e à saúde. Entre outras consequências, a disposição inadequada de pneus propicia a reprodução do mosquito *Aedes aegypti*, popularmente chamado de “mosquito da dengue”.

Portanto, há um fortalecimento nos processos referentes a logística reversa, atualmente, não apenas no que diz respeito aos impactos ambientais, mas também pela crescente pressão das legislações vigentes.

2.3.4.1. Redução de consumo e reaproveitamento de pneus

No caso do pneu, uma maneira de reduzir o consumo é por meio de manutenções periódicas dos veículos. O sistema de rodízio, por exemplo, auxilia na conservação dos pneus, serve para compensar a diferença do desgaste, permite um aumento em quilometragem e em eficiência e proporciona estabilidade ao veículo. (GOTO e SOUZA 2008)

Os autores mostram que, além do sistema de rodízio, a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (2007) recomenda as seguintes medidas para auxiliar na redução do consumo de pneus: a calibragem periódica dos pneus de acordo com a indicação do fabricante do veículo; os automóveis não devem transitar com cargas maiores do que o peso recomendado pelo fabricante; o alinhamento e o balanceamento das rodas devem ser efetuados periodicamente; os pneus não devem ter contato com produtos derivados de petróleo ou solventes que danifiquem a borracha e que possam comprometer a vida útil do pneu; arrancadas bruscas, freadas desnecessárias e transitar sobre vias com “buracos” aceleram o desgaste da banda de rodagem; subir ou descer em

acostamentos ou em outros desníveis ocasionam cortes ou quebras na carcaça ou estouro do pneu.

Nessa primeira etapa, é a primeira medida para reduzir o consumo e evitar o impacto ambiental do descarte. Entretanto, se não é possível evitar este consumo dessas maneiras, deve-se buscar a reutilização. Segundo (SOUZA, 2000), reutilizar significa evitar o descarte do material, utilizando o produto para o mesmo fim ou para outras utilidades. A reutilização é a segunda etapa da gestão de resíduos sólidos, porque traz várias vantagens ao meio ambiente: reduz o consumo de energia, água e outros recursos.

Felizmente, os pneus inservíveis não são necessariamente lixo, podendo assim serem reaproveitados. Mesmo sendo considerados impróprios para a sua utilização usual, o pneu ainda mantém algumas de suas características-chaves, tais como: formato, rigidez, impermeabilidade, além de um poder calorífico elevado. Normalmente, a única característica que é extremamente afetada é a sua adesão à superfície, um dos pré-requisitos mais importantes para que seja utilizado novamente em um veículo. (ARAÚJO e SILVA, 2005)

Em virtude do barateamento dos custos do pneu, quando este é reaproveitado, e da maior conscientização ambiental da humanidade, atualmente, a reciclagem de diversos materiais também vem ganhando importância estratégica. Nota-se, atualmente, os efeitos negativos gerados pelo próprio homem ao despejar esses resíduos sem aproveitamento, na natureza, e o quanto isto contribui para problemas como, doenças, poluição do ar atmosférico, do solo, de rios, dos lençóis freáticos, dentre vários outros.

Por isso, o pneu é considerado um dos maiores passivos ambientais sólidos que existem. Isso quer dizer que quando chega ao fim da sua vida útil seu armazenamento ou destino final deve ser rigorosamente controlado, pois seu descarte inadequado gera riscos à natureza e à população. Dessa forma, o pneu deve ser reciclado ou reutilizado, dentro de certos padrões ambientais.

Atualmente, existem inúmeros estudos e grandes projetos tentando aproveitar este passivo ambiental. Isto acontece porque, de acordo com o CONAMA, a obrigação de dar a destinação final aos pneus inservíveis é do fabricante, sendo dele, então, a obrigação de se livrar ou diminuir o descarte inadequado desse produto.

2.3.5 Reforma dos pneus

Lagarinhos e Tenório 2008) apontaram em seu trabalho uma alternativa para a redução do descarte, além da redução do consumo: a reutilização pelo processo de reforma, na qual o pneu é reconstruído a partir de um pneu usado, onde se repõe uma

nova banda de rodagem, podendo incluir ou não a renovação da superfície externa lateral. O custo para reforma dos pneus no Brasil é bem inferior ao praticado no mercado mundial.

De acordo com o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (2006), o pneu pode ser reformado de três formas:

- **Recapagem:** este processo consiste na remoção da banda de rodagem, no reparo estrutural da carcaça com cordões de borracha e na utilização de cimento para colar a banda de rodagem na carcaça. Os ombros dos pneus não são removidos. (LAGARINHOS e TENÓRIO 2008).

A figura 5 mostra um pneu passando pelo processo de recapagem.

Figura 5 - Processo de Recapagem de Pneus



Fonte: Disponível em: <http://www.recapagemampneus.com.br/nosso-processo>. Acesso em: 22/01/2020

- **Remoldagem:** este processo consiste em remover a borracha das carcaças, de talão a talão, em seguida o pneu é totalmente reconstruído e vulcanizado, sem qualquer emenda, proporcionando balanceamento, apresentação e segurança de uso (LAGARINHOS e TENÓRIO 2008). Em suma, consiste na substituição de sua banda de rodagem, dos seus ombros e de toda superfície de seus flancos.

Os autores afirmam, ainda, que existe uma série de vantagens para a remoldagem de pneus, entre elas: a relação de resistência ao movimento é 3% maior quando comparado com os pneus novos; usam 2,3 vezes menos energia, 1,8 vezes menos ar

comprimido, 25 vezes menos água quando comparado com os pneus novos; reduzem as emissões, poluição da água e resíduos produzidos são baixos quando comparados com os pneus novos; o potencial de aquecimento global é de 1,8 vezes menor que o de um pneu novo. A Figura 6 mostra um pneu passando pelo processo de remoldagem.

Figura 6 - Processo de Remoldagem do Pneu



Fonte: Disponível em: <http://guiapneus.com/pneu-remold-e-bom-confira-os-pros-e-contras>. Acesso em 22/01/2020

- **Recauchutagem:** este processo é simples e preserva cerca de 80% da matéria-prima e da energia necessária para a fabricação de um pneu novo (GOMES, 2007).

Segundo o que foi publicado por Lagarinhos e Tenório (2008), o processo de recauchutagem consiste na remoção da banda de rodagem e dos ombros do pneu. Existem dois processos para recauchutagem dos pneus: o processo a frio um método mais eficiente e a recauchutagem a quente, que demanda menos espaço e oferece um ganho de produtividade.

O processo a frio, explicado pelos autores, utiliza bandas pré-curadas que são coladas nas carcaças após os reparos das mesmas. São utilizados outros componentes para o reparo e união entre a carcaça e a banda de rodagem, que são: o coxim, que é uma lâmina fina de borracha que vai entre a carcaça e a banda pré-curada; e o cordão de borracha utilizado para preencher furos e danos estruturais do pneu. No processo a frio o desenho já está pré-vulcanizado nas bandas de rodagem a serem aplicadas nas carcaças dos pneus já reparadas. Além disso, em tal processo os pneus são vulcanizados em autoclaves, não necessitando de moldes para a formação do desenho no pneu.

Já para a recauchutagem a quente, afirmam que é utilizada uma manta de borracha, na qual é necessária a utilização de moldes para a vulcanização e a formação do desenho na banda de rodagem.

Segundo Martins (2005), no processo de recauchutagem é feita a raspagem mecânica do restante da banda de rodagem velha, para que a carcaça do pneu fique apta a sofrer efetivamente o processo de recauchutagem (aderência de uma nova banda de rodagem) e, então, retorne ao uso, tecnicamente como novo, podendo ser realizado apenas uma vez para os pneus de automóveis, duas a três vezes para os pneus de caminhões, ônibus e veículos industriais e cerca de dez vezes em pneus de aeronaves. Essa raspagem mecânica faz com que o restante da banda de rodagem velha transforme-se em pequenas partículas de diversas granulometrias, com formatos variando de alongados (tipo fibra) a granular (tipo pó). Dessa forma, durante esse processo, as bandas de rodagem dos pneus tornam-se resíduos.

A recauchutagem de pneus no Brasil atinge, segundo estimativas, 70% da frota de transporte de carga e passageiros, sendo uma fonte que contribui em grande número para o acúmulo desse tipo de resíduo (CEMPRE, 2006).

Fioriti (2007) relata a recauchutagem como um processo que consiste em aproveitar a estrutura resistente do pneu gasto, desde que em boas condições de conservação, e incorporar-lhe uma nova banda de rodagem, de forma a dar ao pneu outra vida. Vale lembrar que o processo de recauchutagem também gera resíduos, na forma de fibras ou pó de borracha, os quais desencadeiam os mesmos cuidados quanto a destinação do pneu inservível.

Apesar disso, no processo de redução em pequenas partículas, com a separação do aço, das fibras e da borracha, todos os componentes são reaproveitáveis. O aço é enviado para siderurgia enquanto a borracha e as fibras passarão a possuir outras aplicações (KAMIMURA, 2002). A Figura 7 mostra um pneu em processo de recauchutagem.

Figura 7- Processo de Recauchutagem de Pneus



Fonte: Disponível em: <http://portaldaautopeca.com.br/nsa-pneutec-firma-parceria-com-trukin-pneus/>.
Acesso em 22/01/2020

Vale ressaltar que a proposta deste trabalho é evidenciar a aplicabilidade das fibras de borracha resultantes deste processo, na construção civil.

2.3.6 Resíduo de borracha de recauchutagem de pneu como agregado para concreto

Um agregado é constituído de partículas, sobretudo de rochas, ou por partículas provenientes de depósitos arenosos. Pode também ser constituído por partículas artificiais, especialmente fabricadas para o emprego em concreto ou ainda por partículas obtidas de reciclagem de determinados materiais, de dimensões que variam geralmente entre cerca de 0,1 mm e 20 cm e estão dispersas pela pasta de cimento, sendo necessário tomar em conta que as características do agregado afetam profundamente o comportamento do concreto. (COUTINHO, 1999)

Estudos têm demonstrado que o resíduo de borracha proveniente do processo de recauchutagem apresenta forma fibrilar, embora tenha uma composição bastante heterogênea. Segundo Freitas (2007), este material se torna economicamente mais viável para reciclagem por dispensar a fase de trituração do pneu. As lascas de borracha apresentam poucas impurezas como óleos, fibras de nylon e aço, ou ainda substâncias oriundas ao uso do pneu, por isso podem ser utilizadas como agregados para a composição de concretos.

A borracha de pneu é composta basicamente por um polímero elastomérico, que foi submetido a diversos processos termoquímicos até adquirir as características desejáveis de resistência e durabilidade requeridas para sua aplicação final (ALBUQUERQUE, 2009).

Os elastômeros que compõem essa estrutura são substâncias constituídas de milhares de moléculas ligadas entre si de maneira encadeada, tendo a habilidade de mudar sua configuração pronta e continuamente a temperaturas normais. Tais moléculas tem conformação aleatória em seu estado não tracionado, mas assumem algumas conformações orientadas se forças de tração forem aplicadas em seus extremos. (CRIPA, B. H. S. da. et al., 2013).

2.3.7 Concreto

O conceito de concreto, no sentido mais amplo, é qualquer produto ou massa produzido a partir do uso de um meio cimentante. Geralmente, esse meio é o produto da reação entre um cimento hidráulico e água, mas atualmente, mesmo essa definição pode cobrir uma larga gama de produtos. (NEVILLE, 2013)

Segundo o autor, o concreto pode ser produzido com vários tipos de cimento e também conter pozolanas, como cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, adições minerais, agregados e concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras. Além disso, esses concretos podem ser aquecidos, curados a vapor, autoclavados, tratados a vácuo, prensados, vibrados por impactos, extrudados e projetados. Este autor considera apenas a mistura de cimento, água, agregados (miúdos e graúdos) e aditivos.

A relação entre os constituintes dessa mistura se dá por três possibilidades. Na primeira, o meio cimentício, ou seja, os produtos da hidratação do cimento, é considerado o principal material de construção, com os agregados cumprindo o papel de enchimento barato ou mais barato. Na segunda, os agregados graúdos podem ser interpretados como uma espécie de pequenos blocos de alvenaria, unidos pela argamassa, isto é, a mistura de cimento hidratado e agregados miúdos. A terceira possibilidade é entender que o concreto consiste em duas fases: a pasta de cimento hidratada e os agregados e, como resultado, suas propriedades são regidas pelas propriedades das duas fases, bem como pelas interfaces entre elas (A.M. NEVILLE, 2013).

2.3.8 Concreto com adição de resíduos de borracha de pneu

2.3.8.1 Aplicações na engenharia

A construção civil é um dos setores que provoca maior impacto ambiental, devido ao elevado consumo de matéria-prima. De acordo John (2000), a construção civil consome entre 14% a 50% dos recursos naturais que são extraídos do planeta. Contudo, a utilização de resíduos como matéria-prima na construção civil pode vir a reduzir a quantidade de recursos naturais retirados do meio ambiente.

Os resíduos de borracha de pneu de recauchutagem poderão se tornar grandes auxiliares na produção de materiais alternativos de menor custo, substituindo em grande parte os agregados naturais empregados até o momento.

Assim como outros resíduos estudados atualmente para a incorporação na construção civil, o resíduo de borracha de pneu passa por diferentes processos de reaproveitamento e reciclagem e, de acordo, com as suas propriedades e características ele pode ser aplicado de diferentes maneiras, desde a composição de concretos a argamassas.

De acordo com RMA (2009), as aplicações mais comuns da borracha de pneu na Engenharia Civil incluem:

- Material de enchimento de peso leve;
- Drenagem em campo séptico;
- Aterro em estradas;
- Sistema de drenagem de gases em aterros sanitários;
- Material para compostagem;
- Estabilizadores de encostas;
- Controle de erosão, diques, barragens;
- Cobertura de parques infantis, etc.

Em seu trabalho KROTH, (2012) também destaca diversas aplicações na Engenharia Civil, que vem sendo estudadas, nas últimas décadas, como alternativa de aproveitamento de resíduo de borracha, dentre elas:

- Pavimentos de concreto;
- Utilização como paredes e coberturas, telhas de concreto, blocos de alvenaria e painéis para fins de isolamento térmico e acústico;
- Emprego no envelopamento de dutos ou valas, confecção de passeio público, rodovias, pisos, revestimentos e concretos de baixa exigência estrutural;
- Concreto para utilização em estacas de fundação tipo broca;
- Locais onde são exigidas maior resistência ao impacto e alta absorção de energia, como barreiras de proteção, quebra mar, recifes, postes, elementos de sinalização de trânsito;
- Bloquetes, meio-fio e lajes pré-moldadas.

FIORITI et al. (2002) através de suas análises constataram a viabilidade da utilização da borracha de pneu para a confecção de blocos de alvenaria estrutural e de

vedação. Os resultados obtidos a partir dos ensaios atendem às especificações das normas brasileiras, oferecendo um material mais leve, permitindo facilitar a execução.

GRANZOTTO, (2010) ressalta que seu uso em blocos de pavimentação apresenta-se como uma forma viável para o aproveitamento deste material, visto através da literatura, que a resistência à compressão não é sua principal propriedade. Além disso, os resultados referentes à resistência à abrasão são também pontos favoráveis para esta utilização. Dessa forma, a substituição de parte do agregado por borracha de pneu pode contribuir para a preservação dos agregados naturais e oferecer um modo alternativo de reciclagem para a borracha de pneu.

2.3.9 Propriedades do concreto com adição de borracha de pneu

Diversas são as pesquisas realizadas em todo o mundo sobre a incorporação de partículas de pneu nos compósitos de matriz cimentícia. (ALBUQUERQUE, 2009). Segundo a autora, a incorporação das partículas de pneus na matriz cimentícia é realizada na fase de mistura dos materiais. A mesma pode ser feita por simples adição ou decorrente da substituição parcial da areia, da brita ou do agregado total.

Em seu trabalho, Albuquerque (2009), relata que o principal problema decorrente da combinação desses materiais consiste na fraca aderência entre a matriz do concreto e a borracha de pneu. Uma zona de transição mais fraca pode afetar a formação e a coalescência de microfissuras, afetando a resistência do compósito, fato que tende a se gravar à medida que se aumenta a quantidade de borracha incorporada ao concreto.

Deve-se alertar para o fato de que, na comparação dos estudos, alguns parâmetros devem ser levados em consideração com atenção, pois distintos autores utilizam diferentes tipos, dimensões e métodos de incorporação da borracha de pneu à matriz cimentícia.

Entretanto, Albuquerque (2009) expõe algumas diretrizes gerais que podem ser identificadas pela análise da literatura disponível:

- Geralmente, são usadas partículas de pneu na forma de fibras (procedentes do processo de recauchutagem) ou de grânulos (procedentes da trituração de pneus inservíveis);
- As partículas usadas tendem a ter dimensão característica menor que 4,8 mm;
- As partículas de pneu geralmente substituem frações volumétricas dos agregados;
- Os valores de consumo de cimento e a relação água/cimento são mantidos fixos;

- O controle das alterações de trabalhabilidade é feito por meio de aditivos plastificantes.

Nota-se, portanto, que a granulometria das partículas de pneu interfere diretamente nas propriedades dos compósitos de matriz cimentícia, o que poderá ser visto tanto no estado fresco quanto endurecido.

Assim como a granulometria, as propriedades mecânicas da borracha de pneu também afetam as propriedades finais do compósito (ALBUQUERQUE, 2009).

Na tabela 1 estão apresentados alguns valores característicos das principais propriedades mecânicas da borracha de pneu.

Tabela 1 - Propriedades nominais da borracha de Pneu (Adaptado)

Modulo de Elasticidade	a 100% de deformação	2 Mpa
	a 300% de deformação	10 Mpa
	a 500% de deformação	22 Mpa
Resistência a Tração		28 Mpa
Alongamento		590%
Massa Específica		1,2 g/cm ³

Fonte: Albuquerque (2009)

Observa-se, na tabela, que o módulo de elasticidade é relativamente baixo, enquanto a resistência à tração, a resiliência e a capacidade de alongamento são bastante elevadas. A incorporação de partículas de pneu nos compósitos de matriz cimentícia pode alterar seu comportamento quanto a fluidez e, conseqüentemente, interferir no processo de moldagem do material.

Uma revisão de uma série de estudos sobre este assunto (ELDIN e SENOUCI, 1993a, KHATIB E BAYOMY, 1999; ALBANO et al., 2005; BARROS DA PENHA et al., 2006; BIGNOZZI e SANDROLINI, 2006) indicaram que ocorre uma redução da fluidez do concreto com o aumento do teor e do tamanho das partículas de borracha de pneu, embora a mistura apresente um aspecto homogêneo e de fácil adensamento. A redução da fluidez é atribuída ao aumento da fração de agregados de densidade muito baixa.

Os resultados destes estudos alertam para o fato de que o método de mensuração e o tipo de material gerado (argamassa ou concreto) podem interferir sobre as conclusões acerca da trabalhabilidade para um dado teor de borracha. Ou seja, o concreto ou argamassa podem estar com a fluidez suficiente para a moldagem, mas apresentam um

resultado de baixa trabalhabilidade no ensaio de slump tradicional (ALBUQUERQUE, 2009).

2.3.9.1 Massa específica

A massa específica dos materiais compósitos é uma função das massas específicas de seus materiais constituintes. ALBUQUERQUE (2009) afirma que, no caso dos compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu, é esperado que a massa específica seja reduzida com o aumento do teor de borracha, uma vez que as partículas de borracha são adicionadas, geralmente, em substituição à areia, cuja massa específica é aproximadamente o dobro da massa específica da borracha. Além disso, as partículas de borracha de pneu provocam um aumento no teor de ar aprisionado, o que também afeta a massa específica dos compósitos gerados.

Dessa forma, alguns dos estudos na área (ROSTAMI et al., 1993; LI et al., 1998; KATIB E BAYOMY, 1999; AKAZAKI et al., 2003; ALBANO et al., 2005; ALBUQUERQUE et al., 2008^a) indicam que a massa específica dos compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu tende a sofrer uma drástica redução com o aumento do teor de partículas de borracha, em função da combinação destes dois fatores: diferenças entre as massas específicas dos materiais constituintes e aumento do teor de ar aprisionado.

ALBUQUERQUE et al., (2008^a) buscaram definir modelos de predição da massa específica e da resistência à compressão no estado endurecido, em função da massa específica no estado fresco de concretos com borrachas de pneu, visto que a massa específica do concreto no estado fresco pode ser um importante indicador das características que este apresentará no estado endurecido.

2.3.9.2 Resistência à compressão

O valor da resistência a compressão é normalmente tido como um índice geral da resistência do concreto, sendo por isso um item analisado em quase todos os trabalhos revisados pela autora Albuquerque (2009). Em geral, os dados obtidos pelos pesquisadores da área indicam que a resistência à compressão diminui com o aumento da quantidade de borracha incorporada ao concreto, sendo que, quanto maior for o tamanho das partículas, mais significativa é essa redução. A utilização de partículas de borracha muito pequenas ($\emptyset < 1\text{mm}$), entretanto, também pode ser deletéria às propriedades mecânicas, possivelmente devido a maior superfície específica e maior impacto sobre a

trabalhabilidade deste tipo de partícula (ALBANO et al., 2005; ALBUQUERQUE et al., 2005).

Os estudos analisados (ELDIN E SENOUCI, 1993b); TOPÇU, 1995; KHATIB E BAYOMY, 1999; LI et al., 2004; BIGNOZZI e SANDROLINI, 2006) envolveram substituições crescentes, em volume ou em massa, do agregado miúdo, do agregado graúdo ou do agregado total por partículas de borracha de pneu de diferentes granulometrias para chegar a tais concussões.

2.3.9.3 Resistência à tração

A resistência à tração de compósitos de matriz cimentícia é comumente avaliada por meio de testes de tração por compressão diametral e de flexão em quatro pontos. Esses métodos têm sido usados por diversos pesquisadores para determinar a resistência à tração de argamassas e concretos com borracha de pneu e avaliar o impacto do uso de partículas de pneu nessa propriedade (ALBUQUERQUE, 2009).

Os resultados estudados pela autora mostraram que o valor da resistência à tração, assim como o da resistência à compressão, sofre uma diminuição com a adição de borracha de pneu, mas que a taxa de redução é menos intensa do que no caso da compressão. Além disso, como ocorre na resistência à compressão, a resistência à tração diminui à medida que se aumenta o tamanho e a proporção de partículas de pneu no compósito.

Os comportamentos são semelhantes tanto para o ensaio de compressão diametral quanto para o de flexão. No caso do método de flexão em quatro pontos, apesar do compósito com borracha de pneu apresentar uma menor resistência à tração, foi possível observar uma maior deformação dos corpos-de-prova e um comportamento na fratura mais dúctil, indicando uma maior absorção de energia quando comparado ao concreto de controle (ALBUQUERQUE, 2009).

Nos ensaios à flexão dos estudos analisados de HUYNH et al., (1996); AKAZAKI et al., (2003), os corpos-de-prova de concreto foram capazes de resistir a cargas residuais após a fratura e sofreram considerável deslocamento, caracterizando uma ruptura menos frágil. Esse comportamento foi atribuído à capacidade da borracha, como agregado, sofrer grande deformação elástica antes da fratura do concreto, mostrando-se mais eficaz para o caso de partículas na forma de fibras do que na forma de grânulos, e para fibras médias do que para fibras finas (ALBUQUERQUE, 2009).

Pesquisadores indicam que, apesar das consideráveis perdas de resistências mecânica com a incorporação de partículas de borracha de pneu, o uso do compósito pode ser tecnicamente viável para utilização em paredes e isolamento térmico para fins de cobertura, segundo LIMA et al., (2000) e no envelopamento de dutos em valas de acordo com BAUER et al., (2001).

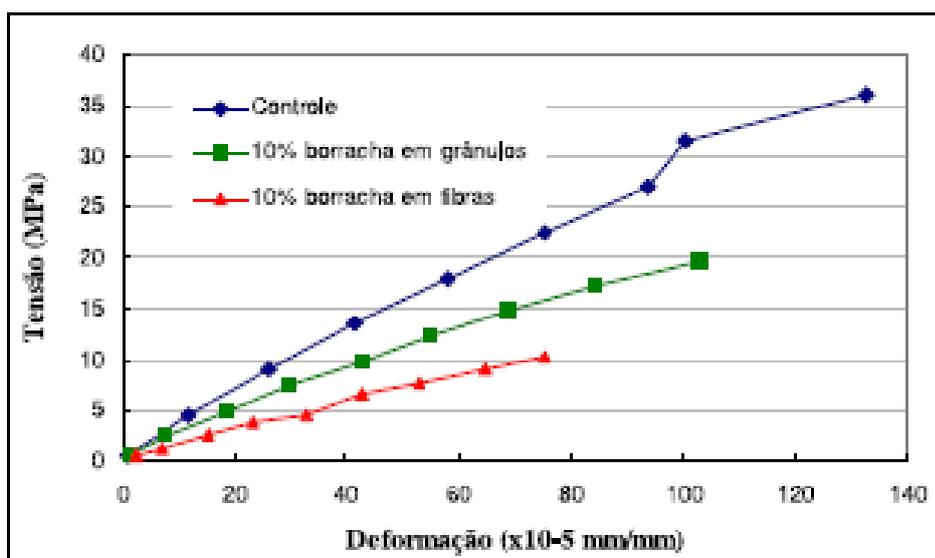
2.3.9.4 Propriedades elásticas

Muitos autores baseiam-se nas propriedades elásticas do Concreto com Borracha de Pneu ao se referirem às suas principais aplicações. Albuquerque (2009), indica que, de fato, o concreto com adição de borracha de pneu, em geral, apresenta maior capacidade de absorção de energia do que o concreto convencional, se constituindo em uma alternativa real para aplicações onde o material estará sujeito a efeitos de impacto e que requerem grande resistência mecânica, tais como barreiras de proteção em rodovias, calçadas revestimentos e concretos de baixa exigência estrutural.

Além disso, pesquisas envolvidas até então, apresentaram uma significativa diminuição do módulo de elasticidade do concreto com a inclusão da borracha em substituição ao agregado, o que significa uma maior possibilidade de deformação do material sob determinada carga (TOPÇU e AVCULAR, 1997a; RIBEIRO et al., 2002).

Na figura 8, tem-se um exemplo do comportamento de deformação típico de compósitos de matriz cimentícia com borracha de pneu.

Figura 8 - Módulo de elasticidade secante em função do tipo de borracha de pneu



Fonte: RIBEIRO et al. (2002)

Observa-se que, para uma mesma tensão, maiores níveis de deformação são alcançados, principalmente quando se utilizam partículas de pneu na forma de fibras.

A introdução de um comportamento mais dúctil se baseia no fato de que, no concreto, o agregado é um dos principais elementos que restringem a deformação. A inclusão de borracha, em substituição parcial do agregado, atenua essa restrição, dando ao concreto uma maior deformabilidade (ALBUQUERQUE, 2009).

As propriedades finais do material compósito vão ser resultado da combinação das propriedades individuais de seus constituintes e das suas respectivas frações volumétricas. De acordo com (TOPÇU e AVCULAR, 1997a), como a borracha possui um módulo de elasticidade cerca de 100 vezes menor que o do agregado, a sua influência dependerá da fração volumétrica utilizada e da forma de substituição, se pelo agregado graúdo ou miúdo.

Albuquerque (2009), aponta, em seu trabalho, que outra abordagem para a modificação de comportamento resultante da adição de partículas de borracha pode ser baseada no fato de que o módulo de elasticidade e a resistência à compressão são duas propriedades ligadas entre si. Assim sendo, analisando sob outro aspecto, a redução do valor do módulo de elasticidade do concreto com borracha de pneu pode ser atribuída não somente à elasticidade da borracha, mas também à redução da resistência do compósito. Por essa razão, torna-se mais adequado analisar o comportamento desse concreto, em termos de absorção de energia, através de sua tenacidade.

A autora afirma, ainda, que o concreto é considerado um material frágil, que se rompe de maneira abrupta e suporta apenas pequenas deformações. Para um material tenaz, a maior parte da energia absorvida até a ruptura é plástica, enquanto que, para um material frágil, a maior parte da energia total é elástica. Portanto, pode-se diminuir a fragilidade do concreto (caracterizada por uma ruptura instantânea e brusca) aumentando sua energia plástica, ou seja, elevando sua capacidade de absorver energia de ruptura através de uma maior deformação.

3 MATERIAIS E METODOS

3.1 Classificação da Pesquisa

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizadoS na pesquisa bem como todos os métodos normativos, materiais e maquinário necessário para promover os experimentos

3.2 Materiais

3.2.1 Resíduo de borracha de pneus

Para produção do concreto utilizou-se como substituição parcial da areia, um resíduo de borracha de pneus adquirido a partir do processo de recauchutagem, produzido por uma fábrica localizada na Região Metropolitana de Belém. O processo se dá em etapas de raspagem, sucção e armazenamento.

Na etapa de raspagem da banda de rodagem dos pneus são gerados os primeiros resíduos de borracha contendo granulometria e formas diversas. O volume de resíduo retirado da banda de rodagem cai naturalmente no chão da fábrica sendo aspirado por uma mangueira, a esse processo chamamos de sucção. Após recolhido, todo esse material é colocado em camburões e dado uma destinação final. Parte dos materiais pode ser selecionado, limpo e revendido para finalidades conhecidas como material para preenchimento de estofados e aparelhos de luta como sacos de box, ou vendido como aterro para gramados sintéticos entre outras utilizações, mas de fato a maior parte do material ainda é destinada ao simples armazenamento em aterros sanitários.

Devido processo de sucção extrair todos os resíduos do chão da fábrica, logo é possível perceber que uma quantidade de impureza se uni ao resíduo de borracha, dentre ela partículas de arame de aço. Logo é necessário a retirada de resíduos que possam contaminar as amostras desse material. Para isso, antes da caracterização, foi realizada a retirada destes materiais metálicos por meio de um imã eletromagnético, para assim fazer a adequada separação desse material em diversas granulometrias, através do peneiramento, classificando-o como resíduo fino, médio e grosso.

O material selecionado para a presente pesquisa é referente a granulometria de tamanho médio, essa granulometria determinada para este trabalho foi praticada uma vez que buscou-se um melhor empacotamento dos grãos de agregado, devidos os demais agregados também possuem baixa granulometria, mas principalmente pela trabalhabilidade do concreto, já que resíduo fino diminui a trabalhabilidade do concreto interferindo no fator água cimento, uma vez que sua superfície de contato é maior dessa forma necessitando ser mais hidratada e o material residual do tipo grosso não seria bem distribuído na mistura devido a não preencher devidamente os vazios, não se comportando no concreto como uma fibra. O material utilizado neste trabalho é composto por: partículas granulares (pó) e fibras curtas com diâmetros (médio e fino), nas etapas de

raspagem manual (a), resíduos gerados no chão da fábrica (b), etapa de sucção do resíduo (c) e estocagem (d) conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Processo de obtenção dos resíduos



Fonte: Silva (2018)

3.2.2 Agregado miúdo

O presente trabalho utilizou um agregado miúdo (areia) originário de uma jazida localizada no Km 21 do município de Castanhal-PA (Figura 15). Após o recebimento do material, foram feitas coletas para amostragem e identificação do agregado segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), que estabelece os requisitos mínimos exigíveis para recepção e produção dos agregados miúdos e graúdos destinados à produção de concreto de cimento Portland. A sua caracterização contou com ensaio de composição granulométrica, conforme o que estabelece a NBR NM 248 (ABNT, 2003), massa específica, segundo os procedimentos descritos na NBR NM 52 (ABNT, 2009), e massa unitária com base na NBR NM 45 (ABNT, 2006). A figura 10 mostra os aspectos visuais da areia em natura.

Figura 10 - Aspecto visual do agregado miúdo utilizado



Fonte: Autor (2020)

3.2.3 Agregado graúdo

A pesquisa teve utilizado como agregado graúdo o seixo rolado de quartzo extraído de uma jazida localizada no município de Capitão Poço – PA. Este material passou pelos mesmos procedimentos descritos para a areia. Quanto a sua caracterização, os ensaios realizados foram: composição granulométrica, com base na NBR NM 248 (ABNT, 2003); massa específica, baseado na NBR NM 53 (ABNT, 2009), e; massa unitária conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006). A figura 11 mostra o seixo tipicamente encontrado na jazida localizada no Município de Capitão poço antes dos processos de caracterização

Figura 11 - Aspecto visual do agregado graúdo em natura utilizado



Fonte: Autor (2020)

3.2.4 Cimento

No projeto experimental realizado em laboratório, para produção Do concreto utilizou-se o cimento Portland CP II F-32, da marca POTY, comumente encontrado na região da capital.

O Cimento CP II-F-32 da Votorantim Cimentos é composto de clínquer (calcário e argila) e calcário, material finamente dividido constituído de carbonato de cálcio. É recomendado para uso geral na construção civil. É ideal para estruturas de concreto armado, concreto usinado, fibrocimento, pavimentos de concreto, argamassas de chapisco, assentamento de blocos, revestimentos, pré-fabricados, fabricação de artefatos de concreto, entre outros.

3.2.5 Água

A água utilizada na pesquisa é proveniente da Cidade de Belém fornecida pelo Sistema de Abastecimento Público da COSANPA.

3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.3.1 Caracterização dos materiais

3.3.1.1 Granulometria do agregado graúdo, agregado miúdo e resíduos de borracha

O ensaio de determinação da composição granulométrica seguiu os procedimentos estabelecidos pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). Primeiramente ocorreu a homogeneização dos materiais seguida do quarteamento. Na caracterização do seixo utilizou-se duas amostras com 5 kg; para a areia duas amostras com 1kg; e para a borracha duas amostras com 3kg. Após secar o material em estufa à temperatura de 110°C (a borracha permaneceu na estufa por um período de apenas 4 horas) e deixar esfriar ao ar, procedeu-se a pesagem das amostras m1 e m2. Logo após, o material foi peneirado manualmente.

Após esse processo, foram pesadas as massas retidas em cada peneira e calculadas as porcentagens médias, retida e acumulada, a dimensão nominal máxima característica ($D_{máx}$), e o módulo de finura (MF) do agregado. Com os dados do ensaio foi confeccionada a curva de distribuição granulométrica.

3.3.1.2 Caracterização do agregado miúdo

Para a determinação da massa específica da areia, seguiu-se os procedimentos adotados pela NBR NM 52 (ABNT, 2009). Primeiro realizou-se a homogeneização e o

quarteamento para a obtenção de duas amostras de aproximadamente 1 Kg, que posteriormente foram submersas em água durante um período de 24 horas. Após o período de imersão o material foi retirado da água e seco. Após saturada a areia, pesou-se duas amostras de 500g, cada uma, colocou-se em um frasco de vidro, e registrou-se a massa do conjunto. Posteriormente, encheu-se o frasco com água até a marca de 500 ml, e colocou-se submerso em um recipiente. Após o intervalo de uma hora, completou-se o frasco com água até a marca de 500 cm³, e determinou-se a massa. No final do processo o agregado miúdo foi retirado do frasco e colocado em estufa para secagem por 24 horas, a uma temperatura de (105°C). Em seguida, determinou-se a massa seca. As massas específicas foram então calculadas de acordo com a sequência de cálculos estabelecida na NBR NM 52 (ABNT, 2009).

3.3.1.3 Caracterização do agregado graúdo

Os ensaios foram realizados segundo as informações presentes na NBR NM 53 (ABNT, 2009). Inicialmente o seixo foi submerso em água durante um período de 24 horas. Então retirou-se a amostra da água e secou-a com toalhas de papel absorvente. Verificou-se a massa da amostra saturada de superfície seca e transferiu-se a amostra em um cesto de arame, submergindo-a em água a temperatura de (23 °C). Após esse processo, pesou-se a amostra em água, utilizando uma balança hidrostática. A massa específica do seixo foi calculada de acordo com as Equações constantes na NBR NM 53 (ABNT, 2009).

3.3.1.4 Caracterização do resíduo de borracha

A NBR não possui uma especificação para caracterização do resíduo de borracha, dessa forma utilizou-se na pesquisa para determinação da massa específica do resíduo de borracha os procedimentos descritos na Norma ASTM C 792 (2015). Inicialmente, pesou-se duas amostras de 500 g, cada uma, que foram colocadas em estufa durante 4 horas, a uma temperatura de (110°C). As amostras foram resfriadas ao ar, durante 2 horas, e colocadas em uma proveta contendo querosene (utilizou-se este líquido devido à sua baixa massa específica), o querosene permite que a amostra tenha total decantação e o material fique suspenso. Após a inserção do resíduo, agitou-se o frasco para eliminação das bolhas de ar e então realizou-se a leitura do nível atingido pelo líquido no gargalo do frasco indicando o volume em cm³ ocupado pelo conjunto (querosene-agregado)

Utilizou-se o procedimento de ensaio estabelecido pela NBR NM 45 (ABNT, 2006) para determinação da massa unitária dos agregados e do resíduo de borracha.

Primeiramente foi aferida a massa do recipiente prismático (em Kg). Logo após secou-se o seixo e a areia em estufa a uma temperatura de (110°C) durante 24 horas (a borracha apenas 4 horas). Com o material seco, encheu-se o recipiente em três camadas de 1/3 de altura, aplicando-se em cada uma delas 25 golpes com uma haste, de modo a distribuir uniformemente a amostra. Posteriormente, nivelou-se a superfície com uma régua metálica e pesou-se o conjunto (recipiente-agregado) em kg. Esse procedimento foi repetido por 3 vezes consecutivas, e então partiu-se para os cálculos utilizando-se a equação presente na referida norma.

3.3.2 Determinação da dosagem

Dentre os métodos existentes para o cálculo da dosagem o presente trabalho utilizou o método da ABCP (Associação Brasileira de cimento Portland) que é uma adaptação da norma ACI (American Concrete Institute) para agregados brasileiros.

Primeiramente define-se o f_{cj28} (resistência característica do concreto aos 28 dias, (Equação 1). Visto que o trabalho pretende avaliar a utilização do concreto em elementos pré-fabricados adotou-se o f_{ck} (resistência característica do concreto) em 35 Mpa segundo estabelecido na NBR 9781 (ABNT, 2013), e utilizando-se o desvio padrão de (5,5), obtendo-se assim, um $f_{cj28} = 44,075$ MPa. Utilizando-se a curva de Abrams, se estabeleceu a relação água/cimento em 0,44, chegando assim ao consumo de materiais necessários para a produção de 1m³ de concreto (sem adição de borracha), conforme mostra a Tabela 4. Sendo assim, o traço utilizado na pesquisa foi (1:1,17, 2,74). Foram utilizados três traços, sendo um de referência, denominado CP-R (sem adição de resíduo), e outros dois com substituição de 5% - (CP – 5%) e 7% (CP – 7%) em massa de agregado miúdo por borracha.

As substituições do agregado miúdo nessas proporções se deram pelo motivo desta tratar-se da continuação da análise de inserção de resíduos de borracha em diferentes proporções, de acordo com o trabalho de Silva (2018), foram feitas análises da inserção de resíduo de borracha do tipo média. Nas proporções de 6% e 9% tendo seus resultados mais positivos em dosagens próximas a inferior, dessa forma dando continuidade às análises feitas pelo autor as porções de superior e inferior aos melhores resultados obtidos na pesquisa decidiu-se utilizar as proporções de 5% e 7% de substituição em massa de agregado miúdo. A tabela 2 demonstra a dosagem do concreto nos referidos traços para a produção de um metro cubico de concreto.

$$F_{cj_{28}} = F_{ck} + 1,65.sd \quad (1)$$

Tabela 2 - Consumo de materiais para 1m³ de concreto

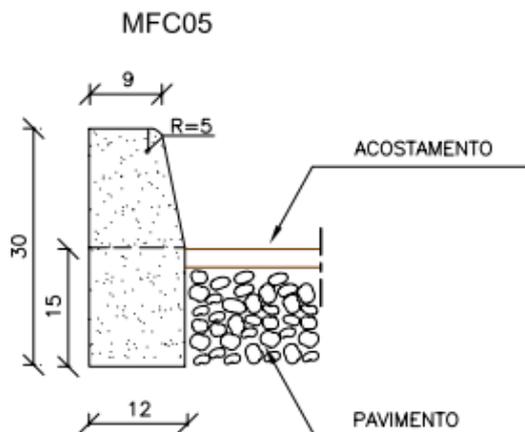
Traços	Nome	Cimento (Kg/m ³)	Seixo (Kg/m ³)	Areia (Kg/m ³)	Água (l/m ³)	Borracha (Kg/m ³)
1: 1,17: 2,74	CP-R	444,44	1216,6	518,3	195,55	0
1: 1,17: 2,74 com substituição de (5%)	CP-5%	444,44	1216,6	492,385	195,55	25,915
1: 1,17: 2,74 com adição de (7%)	CP-7%	444,44	1216,6	482,019	195,55	36,281

Fonte: Autor (2020)

3.3.3 Fabricação do concreto

De acordo com a NORMA DNIT 020/2006 – ES os dispositivos abrangidos por esta Especificação serão executados de acordo com as indicações do projeto. Na ausência de projetos específicos deverão ser utilizados os dispositivos padronizados pelo DNER, que constam do Álbum de Projetos-Tipo de dispositivos de Drenagem. Segundo o Álbum o meio fio deve ter as especificações contidas na figura 12.

Figura 12 - Especificações do Meio-Fio



CONSUMOS MÉDIOS	
ESCAVAÇÃO	≤ 0,05m ³ /m
CONCRETO fck 15MPa	0,034m ³ /m
FORMAS DE MADEIRA COMUM	0,63m ² /m

Fonte: Álbum de Projetos-Tipo de dispositivos de Drenagem (2006)

Inicialmente separa-se o material já caracterizado e pesa em quantidades praticáveis para cada betonada. Enquanto o material é pesado realiza-se a limpeza e umidificação da betoneira. Primeiro realizou-se o traço de referência, colocou-se o agregado graúdo, uma parte da areia e uma parte da água, e mistura durante

aproximadamente um minuto. Depois adicionou-se o cimento e o restante do cimento e realizou-se nova mistura. Por fim adiciona-se o restante da água aos poucos em intervalos de 30 segundos. Após finalizada cada betonada foi necessário a completa higienização da betoneira, a fim de evitar a contaminação das amostras.

Para os em que houve substituição de parte da areia o procedimento se deu da seguinte forma: Primeiramente colocou-se o agregado graúdo, parte do agregado miúdo e parte da borracha e parte do cimento e misturou na betoneira durante aproximadamente um minuto, após a primeira mistura, colocou-se o restante do agregado miúdo, a borracha e o restante do cimento. Misturou novamente adicionando a água na mistura em intervalos de 30 segundos. Ao final de todo o processo de mistura o concreto foi colocado em fôrmas previamente untadas com desmoldante e seguiu-se o procedimento padrão para moldagem de concreto, conforme estabelece a NBR 5738 (ABNT, 2015). Foram dispostas duas camadas de concreto nos corpos de prova, e cada uma delas foi adensada manualmente. Após isso, as amostras foram postas em um tanque para cura úmida. As figuras 13 (a) e (b) mostram o concreto após a moldagem para a fabricação dos blocos de meio-fio e CP's para ensaios mecânicos, e as figuras 14 (a) e (b) mostram a preparação dos CP's já desmoldados em tanque para a câmara úmida e a figura 15 mostra o resultado final da fabricação do meio fio com diferentes dosagens.

Figura 13 – Fabricação e identificação dos Corpos de Prova



Fonte: Autor (2020)

Figura 14 - Cura úmida dos blocos de meio fio de concreto



Fonte: Autor (2020)

Figura 15 – Meio-fio Pré-fabricado com diferentes traços



Fonte: Autor (2020)

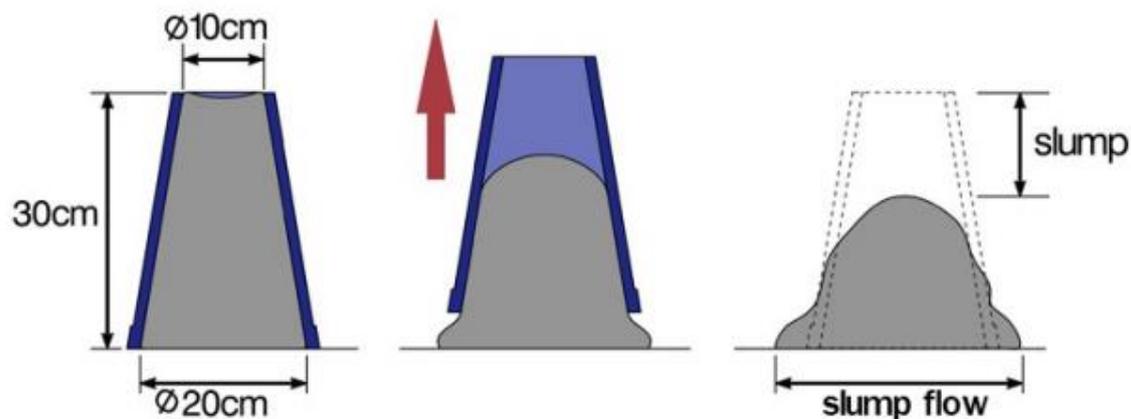
3.3.4 Slump Test

Para a determinação da fluidez do concreto foi realizado nesta pesquisa o *slump test*. Segundo Vieiro (2010), a consistência é determinada através do grau de fluidez do concreto no estado fresco, tratando-se da mobilidade da massa. Sendo que a relação entre a água e os agregados secos é o fator que mais influencia na consistência.

Segundo a NBR NM 67 (1998), o molde para o corpo-de-prova deve ser feito de metal e com espessura igual ou superior a 1,5 mm, seu interior deve ser liso e livre de protuberâncias. O molde deve ter forma de um tronco de cone oco, e com as seguintes dimensões internas:

- Diâmetro da base inferior: 200 mm \pm 2 mm;
- Diâmetro da base superior: 100 mm \pm 2 mm;
- Altura: 300 mm \pm 2 mm.

O esquema para realização é mostrado na figura 16

Figura 16 – Esquema para realização do *slump test*

Fonte: TEODORO (2013)

3.3.5 Ensaios físicos e mecânicos

3.3.5.1 Ensaio de compressão axial simples

O ensaio de compressão axial simples foi realizado segundo as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2007), que prescreve uma metodologia, na qual devem ser ensaiados à compressão os corpos de prova cilíndricos de concreto, moldados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015) e extraídos conforme a NBR 7680 (ABNT, 2015). O procedimento consiste em posicionar os corpos de prova de concreto sobre uma prensa hidráulica (Figura 17), que aplicará uma força axial, submetendo-os a um esforço máximo até o rompimento, a fim de determinar o nível de carga suportado pela amostra correspondente a cada traço.

Figura 17 - Prensa hidráulica para ensaios de compressão axial



Fonte: Autor (2020)

Após o procedimento, realizou-se a determinação da resistência à compressão axial, dividindo-se o valor da força aplicada pela área do corpo de prova rompido, conforme a (Equação 2) a seguir, retirada da NBR 5739 (ABNT, 2007).

$$f_c = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (2)$$

f_c : resistência à compressão, em MPa;
 F : força máxima alcançada, em N;
 d : diâmetro do corpo-de-prova, em mm.

3.3.5.2 Ensaio de resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado com base na norma ASTM C 293 (2016). O procedimento consistiu em posicionar os corpos de prova de seção prismática com dimensões de 10x10x30 cm, com 14, 21 e 28 dias de idade, sobre um suporte metálico de aço, onde o concreto ficou apoiado na base inferior através de dois cutelos (Figura 30). Em sua parte superior, foi centralizado, de forma simétrica, o sistema de carregamento de força que aplicou uma carga de forma contínua entre 3 a 6% da carga máxima estimada até o ponto de ruptura do corpo de prova.

Por fim, calculou-se a resistência à tração na flexão com aproximação de 0,01 MPa para os resultados individuais, utilizando a Equação 3, retirada da ASTM C 293 (2016).

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3)$$

Onde:

R: módulo de ruptura ou resistência ao dobramento, em psi ou MPa;

P: carga Máxima Aplicada conforme indicado pela máquina, em lbf ou N;

L: comprimento de span, em polegada ou mm;

b: espessura média da amostra na fratura, em polegadas ou mm;

d: profundidade média da amostra na fratura, em polegadas ou mm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como objetivo explicar os resultados obtidos nos ensaios realizados, bem como, as discussões e análises das propriedades físico-mecânicas do concreto com e sem adição de borracha.

4.1 *SLUMP TEST*

Na verificação da consistência do concreto no estado fresco, parte importante pelo fato da inserção da borracha modificar a trabalhabilidade do concreto, retirou-se uma amostra que foi submetida ao ensaio do abatimento pelo tronco de cone (*slump test*), segundo o que o prescrito na NBR NM 67 (ABNT, 1998). Primeiramente, umedeceu-se o molde e a placa metálica, depois preencheu-se o cone com o concreto em três camadas intercaladas que sofreram, cada uma, 25 golpes com uma haste metálica. Retirou-se o excesso da superfície do molde e então o cone foi levantado e posicionado de forma invertida ao lado da amostra de concreto. Com o auxílio de uma régua metálica, fez-se a leitura da diferença entre a altura do molde e a do eixo do corpo de prova desmoldado. As figuras 18 (a), (b) e (c) mostra o *Slump* do concreto de Referência, com substituição parcial de 5% e 7% respectivamente. É notável a mudança na consistência do concreto a medida que se adiciona o resíduo de borracha.

Figura 18 - Ensaio de abatimento do concreto de referência



Fonte: Autor (2020)

4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Com os dados obtidos no ensaio de granulometria, formularam-se as Tabelas 3, 4 e 5. Nelas podem ser observadas as porcentagens médias, retidas e acumuladas, em cada uma das peneiras, bem como, as dimensões características e os módulos de finura encontrados para o seixo, areia e resíduo de borracha.

Tabela 3 - Análise granulométrica do agregado miúdo
Areia

abertura das peneiras (mm)	primeira amostra			segunda amostra			%retida média	% retida acumulada média
	peso da amostra (g)	% retida	% retida acumulada	peso da amostra (g)	% retida	% retida acumulada		
6,3	0	0	0	0	0	0	0	0
4,75	0	0	0	0	0	0	0	0
2,36	0,3	0	0	0,3	0	0	0	0
1,18	7	0,7	0,7	6,1	0,6	0,6	1	1
0,6	50	5	5,7	47,5	4,8	5,4	5	6
0,3	414	41,4	47,1	435,4	43,5	48,9	42	48
0,15	424,3	42,4	89,5	403,7	40,4	89,3	41	89
0,075	75,4	7,6	97,1	74,4	7,4	96,7	8	97
FUNDO	29	2,9	100	32,6	3,3	100	3	100
TOTAL	1000			1000				
Caracterização	Observações:							
MF(%)	1,44							

D. Máx. (mm) 1,2 NBR NM 248-2003 - Agregados - Determinação da composição granulométrica

Fonte: Autor (2020)

Tabela 4 - Análise granulométrica do Resíduo de borracha
Borracha

abertura das peneiras (mm)	primeira amostra			segunda amostra			%retida média	% retida acumulada média
	peso da amostra (g)	% retida	% retida acumulada	peso da amostra (g)	% retida	% retida acumulada		
6,3	9,1	3	3	9	3	3	3	3
4,75	19,8	6,6	9,60	19,3	6,5	9,5	7,0	9,6
2,36	135,8	45,40	55,0	138,5	46,40	55,90	46,0	55,5
1,18	113,5	37,90	92,9	111,5	37,30	93,2	38	93,1
0,6	17,2	5,80	98,7	16,5	5,50	98,7	6,0	98,7
0,3	0,8	0,30	99,0	1	0,30	99,0	0,0	99,0
0,15	1,5	0,50	99,5	1,5	0,50	99,5	1,0	99,5
0,075	1,5	0,50	100,0	1,4	0,50	100,0	1,0	100,0
FUNDO	0	0,00	100,0	0	0,00	100,0	0,0	100,0
TOTAL	299,2			298,7				
Caracterização	Observações:							
MF(%)	4,55	NBR NM 248-2003 - Agregados - Determinação da						
D. Máx. (mm)	6,3	composição granulométrica						

Fonte: Silva (2018)

Tabela 5 - Análise granulométrica do agregado graúdo
Seixo

abertura das peneiras (mm)	primeira amostra			segunda amostra			%retida média	% retida acumulada média
	peso da amostra (g)	% retida	% retida acumulada	peso da amostra (g)	% retida	% retida acumulada		
19	22,6	0,5	0,5	14,5	0,3	0,3	0	0
12,5	612,9	12,3	12,8	691,7	13,8	14,1	13	13
9,5	648,9	13	25,8	643,3	12,9	27	13	26
6,3	952,3	19	44,8	853,3	17	44	18	44
4,75	1011,6	20,2	65	904,6	18,1	62,1	19	64
2,36	1216,2	24,3	89,3	1175,3	23,5	85,6	24	87
1,18	308,8	6,2	95,5	352,6	7,1	92,7	7	94
0,6	103,6	2,1	97,6	141,5	2,8	95,5	2	97
0,3	57,2	1,1	98,7	101,4	2	97,5	2	98
0,15	31,4	0,6	99,3	63,2	1,3	98,8	1	99
0,075	13,2	0,3	99,6	25	0,5	99,3	0	99
FUNDO	21,3	0,4	100	33,6	0,7	100	1	100
TOTAL	5000			5000				
Caracterização	Observações:							
MF(%)	5,65	NBR NM 248-2003 - Agregados - Determinação						
D. Máx. (mm)	19	da composição granulométrica						

Fonte: Autor (2020)

Onde:

Peso da amostra (g) = peso inicial das amostras utilizadas no ensaio;

% Retida = porcentagem individual de material retido na peneira;

% Retida Acumulada = porcentagem retida acumulada individual em cada uma das peneiras. 76

% Retida média = porcentagem retida média das amostras em cada peneira;

% Ret. Acumulada Média = porcentagem acumulada média de material retido na peneira;

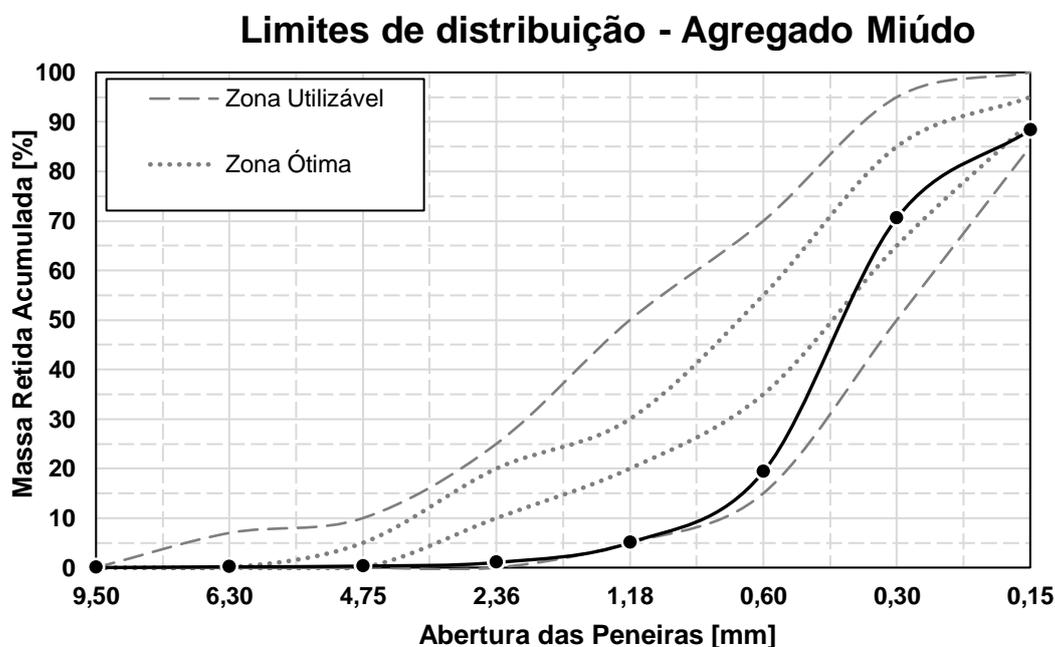
MF = módulo de finura dos agregados;

D. Max. (mm) = dimensão máxima característica dos agregados.

Conforme a classificação da NBR 7211 (ABNT, 2009), a areia por apresentar um módulo de finura de (1,80) enquadra-se na faixa da Zona Utilizável Inferior. O seixo assemelha-se a brita zero, já que a sua curva granulométrica se encontra entre os limites superiores e inferiores dos parâmetros desse tipo de agregado.

As figuras 19, 20 e 21 apresentam a curva de distribuição granulométrica do seixo, areia e da borracha, respectivamente. Pode-se observar que o resíduo de borracha apresenta uma distribuição bem uniforme, tendo seu maior percentual retido na peneira com malha de abertura de 2,36 mm, enquanto que o seixo comporta-se de forma semelhante, tendo seu maior percentual retido na peneira de 9,5 mm. A areia por sua vez, possui a maior porcentagem retida na peneira de 0,3 mm. O fato de o resíduo de borracha não ter se enquadrado dentro dos limites para ser classificado como agregado miúdo pode estar relacionado à morfologia que o mesmo possui, a qual é bem irregular e por isso, dificulta a determinação da composição granulométrica da amostra.

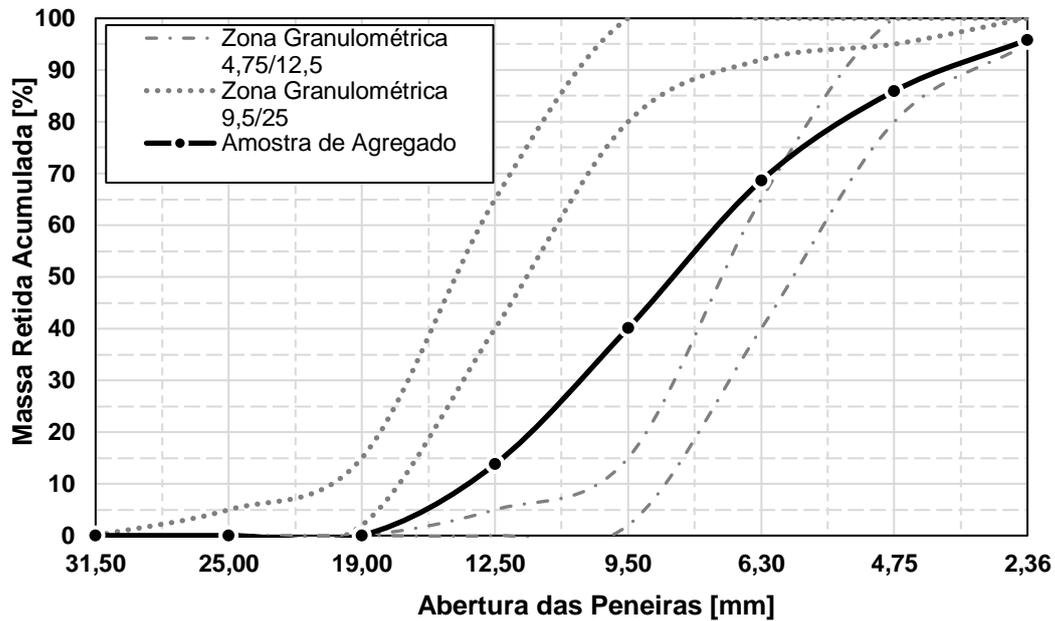
Figura 19 - Curva de distribuição granulométrica (Areia)



Fonte: Autor (2020)

Figura 20 - Curva de distribuição granulométrica (Seixo)

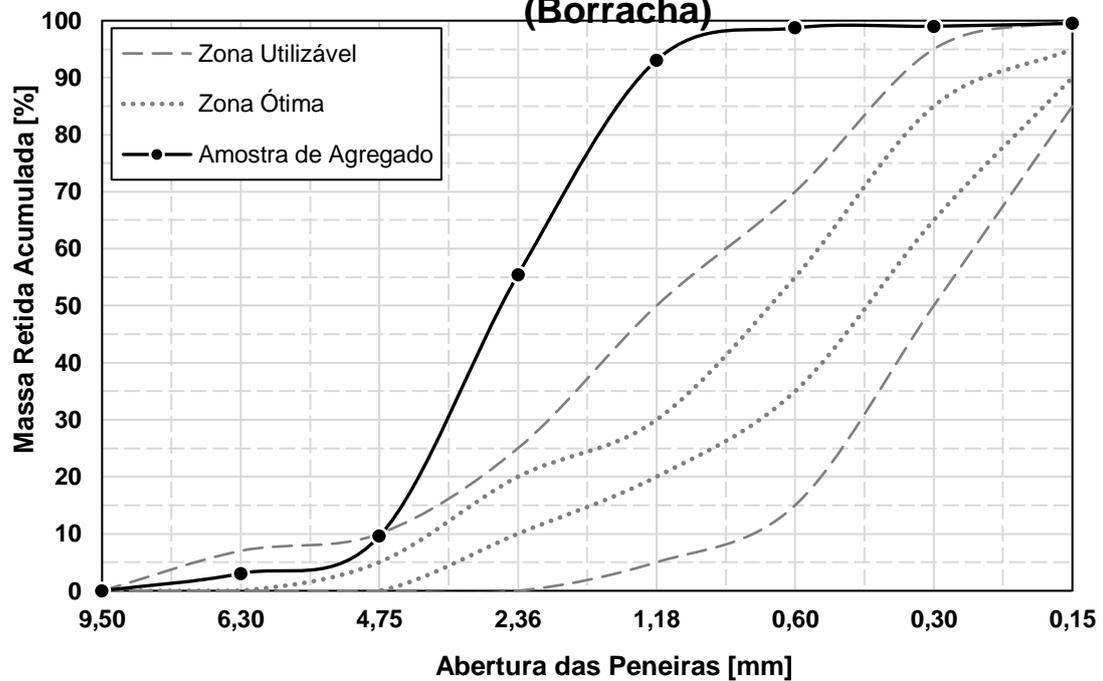
Limites de distribuição - Agregado Graúdo



Fonte: Autor (2020)

Figura 21 - Curva de distribuição granulométrica (Borracha)

Limites de distribuição - Agregado Miúdo (Borracha)



Fonte: Autor (2020)

4.3 MASSA UNITÁRIA E ESPECÍFICA

Os valores de massa unitária foram descritos na tabela 6, é visto que em relação aos demais agregados a massa específica da borracha apresenta valores consideravelmente baixos. Não se verifica na literatura uma normatização específica para a caracterização do resíduo da borracha, desse modo compreende-se que as diferenças entre métodos de ensaios realizados possam influenciar os resultados, entretanto os valores de massa unitária do material utilizados na pesquisa estão equiparados aos encontrados em pesquisas anteriores que apresentam massa unitária na faixa de 0,27 a 0,5 g/cm³.

Tabela 6 - Relação de massa específica dos agregados

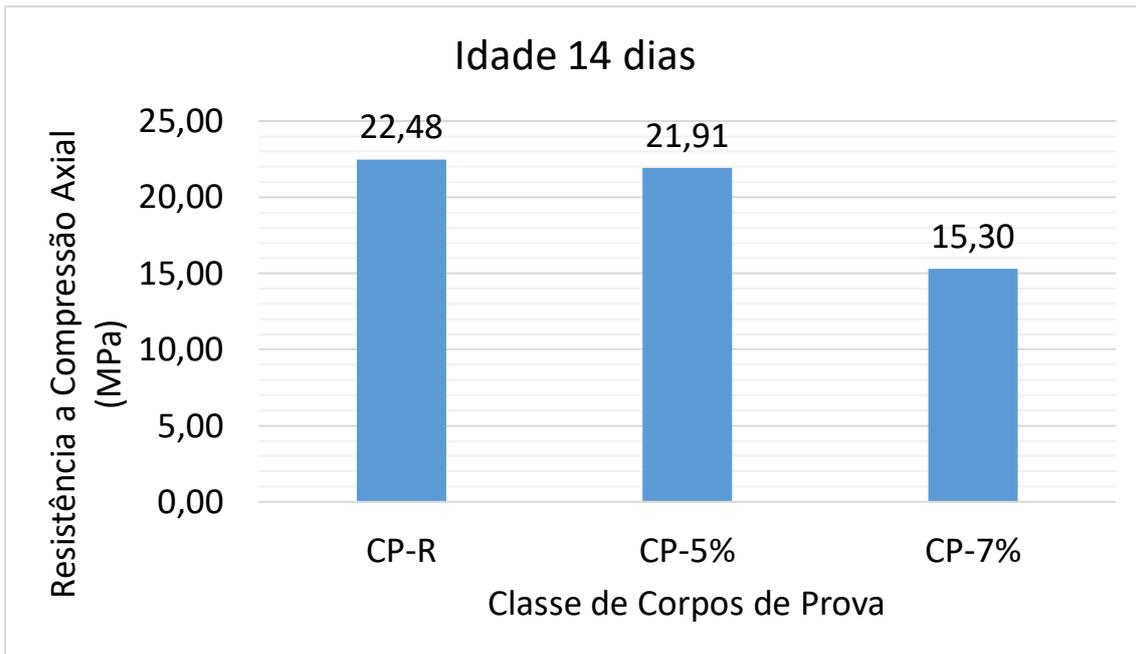
Agregado	Massa Específica	Massa Unitária
Seixo	2,56	1,58
Areia	2,63	1,59
Resído de Borracha	1,11	0,35

Fonte: Silva (2020)

4.4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL

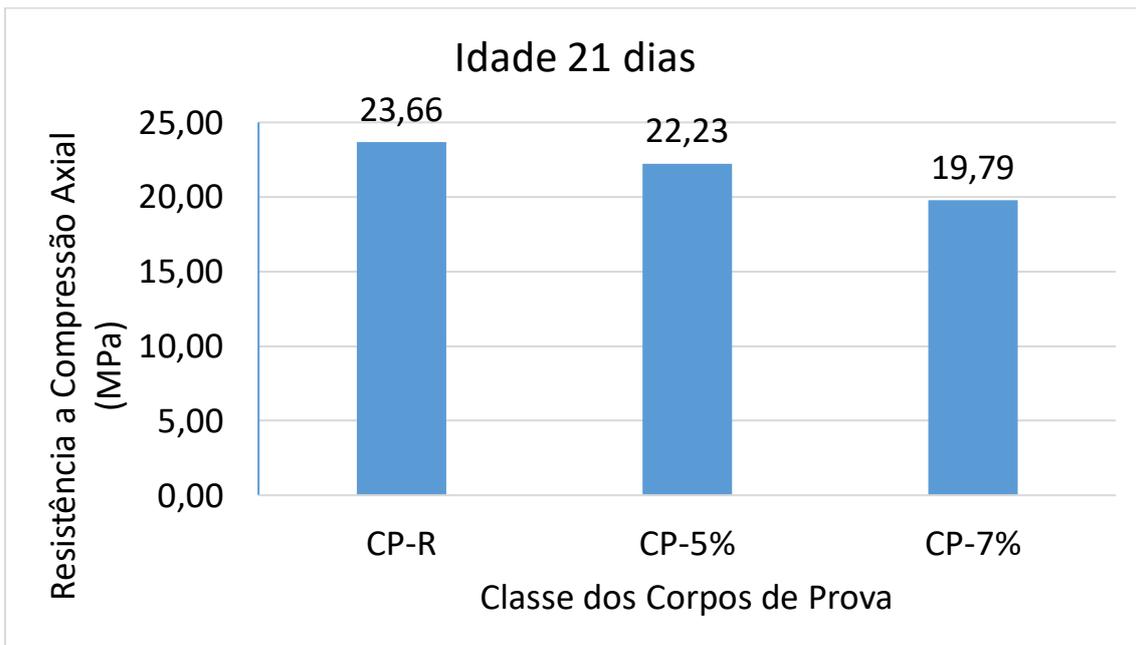
Os gráficos a seguir expressam os valores dos resultados do ensaio de compressão axial nas datas de 14, 21 e 28 dias de cura do concreto. Observa-se que com a inserção da borracha a resistência do concreto tende a baixar quanto maior for o percentual de substituição do agregado pelo resíduo, fato que já era esperado, tendo em vista que outros trabalhos semelhantes já demonstraram essa análise. De acordo com Silva, 2018; segundo o trabalho de Moreira, Fidelis e Dias, 2014; a baixa na resistência se dá também por fatores de aumento no consumo de água pela mistura, o que interfere não apenas na trabalhabilidade do concreto bem como em sua resistência. Outros autores como Brito, 2013 atribuem a baixa da resistência do concreto também a má aderência entre a matriz cimentícia do concreto com a superfície do resíduo de borracha. No que diz respeito a proposta deste trabalho, podemos adotar como satisfatória a eficiência deste material uma vez que sua aplicação em bordas de passeio não requer alta resistência, sendo assim o concreto torna-se um meio viável para inserção deste resíduo que antes era descartado de maneira agressiva na natureza. As figura 22, 23 e 24, mostram o comparativo do resultado dos CP's de referência, com 5% e 7% de substituição por resíduo em idades de 14, 21 e 28 dias respectivamente

Figura 22 - Resultados do ensaio à compressão axial



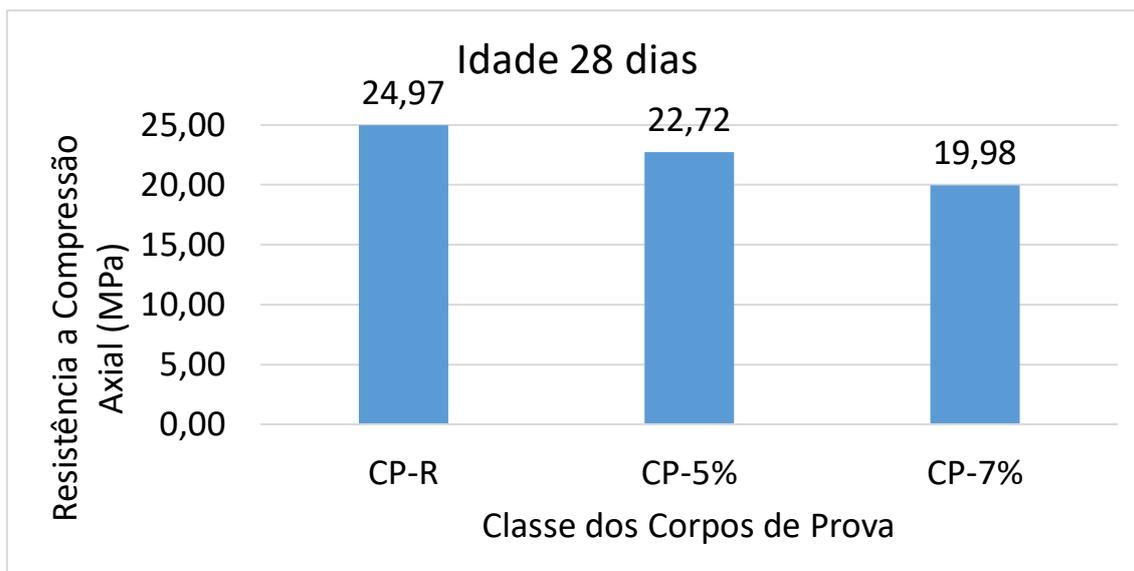
Fonte: Autor (2020)

Figura 23 - Resultados do ensaio à compressão axial aos 21 dias



Fonte: Autor (2020)

Figura 24 - Resultados do ensaio à compressão axial aos 28 dias

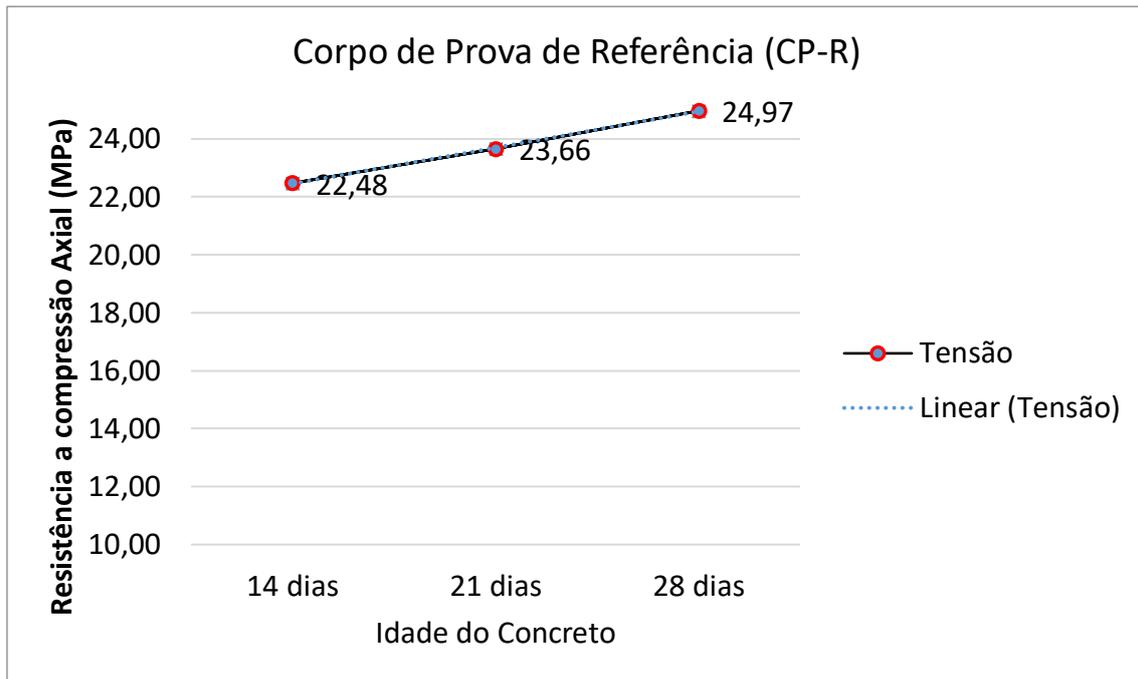


Fonte: Autor (2020)

É possível observar de acordo com os resultados dos ensaios de compressão axial demonstram que existe uma relação inversa entre a quantidade de borracha no concreto e sua resistência. Observa-se que não há grande dispersão de resultados entre as composições. Ao analisar a queda de resistência do concreto por idade de rompimento, verifica-se que aos 14 dias o concreto com borracha, tanto o CP-5% quanto CP-7% apresentam uma queda de resistência de aproximadamente 30% em relação ao CP-R, sendo que aos 28 dias essa diferença diminui para 20% e 10% para o compósito com adição de 5 e 7%, respectivamente. Estes resultados quando comparados com os trabalhos realizados por Altoé (2017) que obteve uma redução de 54,6% para o concreto com adição de 7% de borracha e 79,84% para uma adição de 10%. Logo a perda de resistência do concreto produzido é considerável, porém não torna a pesquisa ineficiente, uma vez que mesmo com a perda é possível a utilização do concreto na fabricação de bordas de passeio. É válido ressaltar, que assim como o presente trabalho os trabalhos citados também realizaram a substituição em fração parcial em massa de agregado miúdo pelo resíduo de borracha.

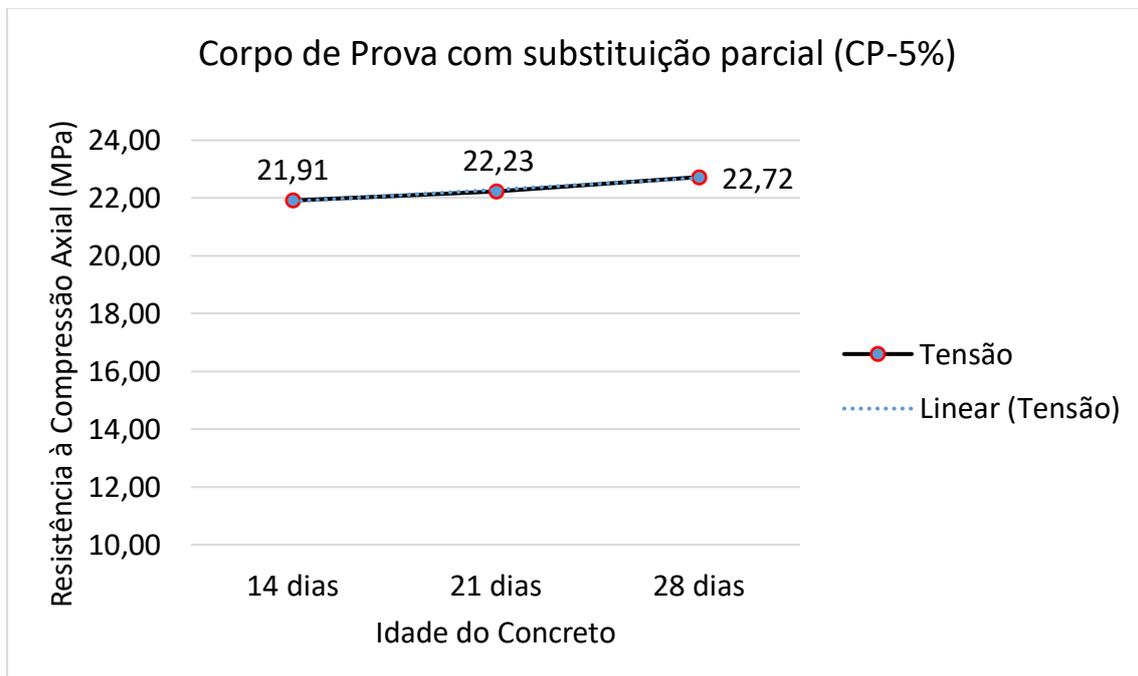
Também foram feitos gráficos comparativos para cada classe demonstrando o ganho de carga durante as diferentes idades do concreto. As figuras 25, 26 e 27 mostram o incremento de carga em MPa de cada classe ao longo das idades

Figura 25 - Ganho de Resistência (MPa) durante as idades do concreto (CP-R)



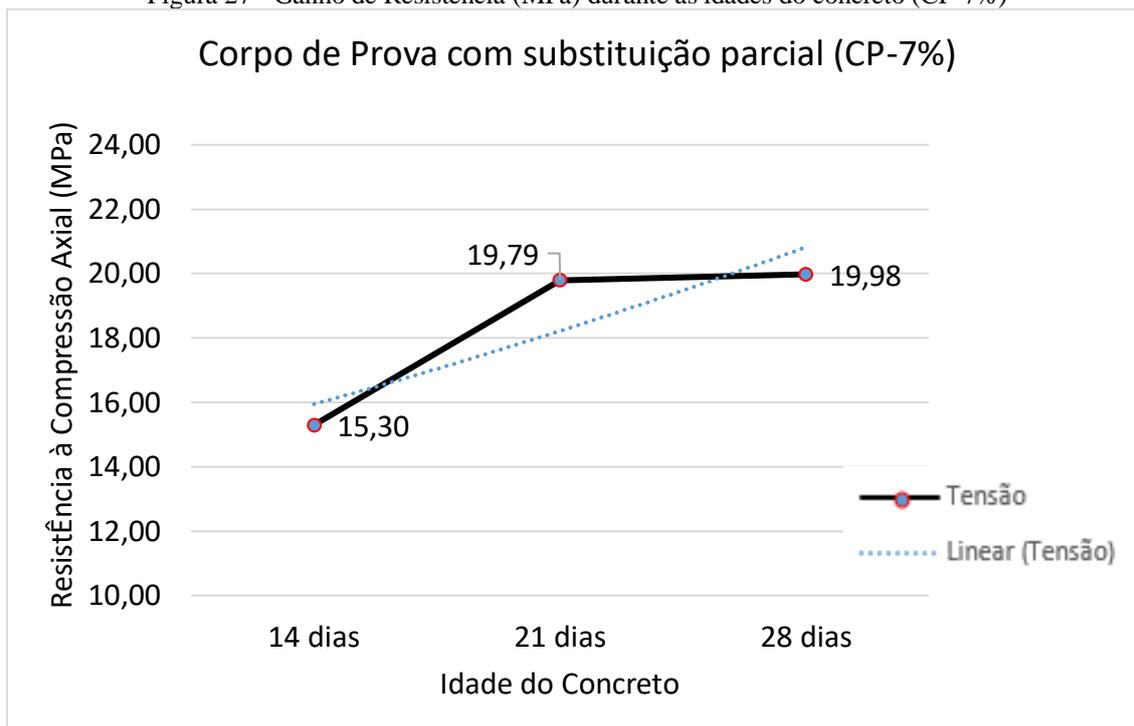
Fonte: Autor (2020)

Figura 26 - Ganho de Resistência (MPa) durante as idades do concreto (CP-5%)



Fonte: Autor (2020)

Figura 27 - Ganho de Resistência (MPa) durante as idades do concreto (CP-7%)



Fonte: Autor (2020)

Os resultados dos experimentos mostram que nos corpos de prova CP-5% o ganho de carga nos sete últimos dias é reduzido, já nos cp-7% quase não há aumento da resistência nas últimas idades do concreto, a linha de tendência mostra que os CP-7% saíram no padrão de referência. São necessários novos estudos e testes para chegar a uma conclusão mais satisfatória que explique o fenômeno. A figura 28 mostra um comparativo das rupturas dos CPS com adição de 7% e 5% de substituição de agregado em relação ao modo de ruptura de uma CP de referência.

Figura 28 - comparativo CPs após o rompimento

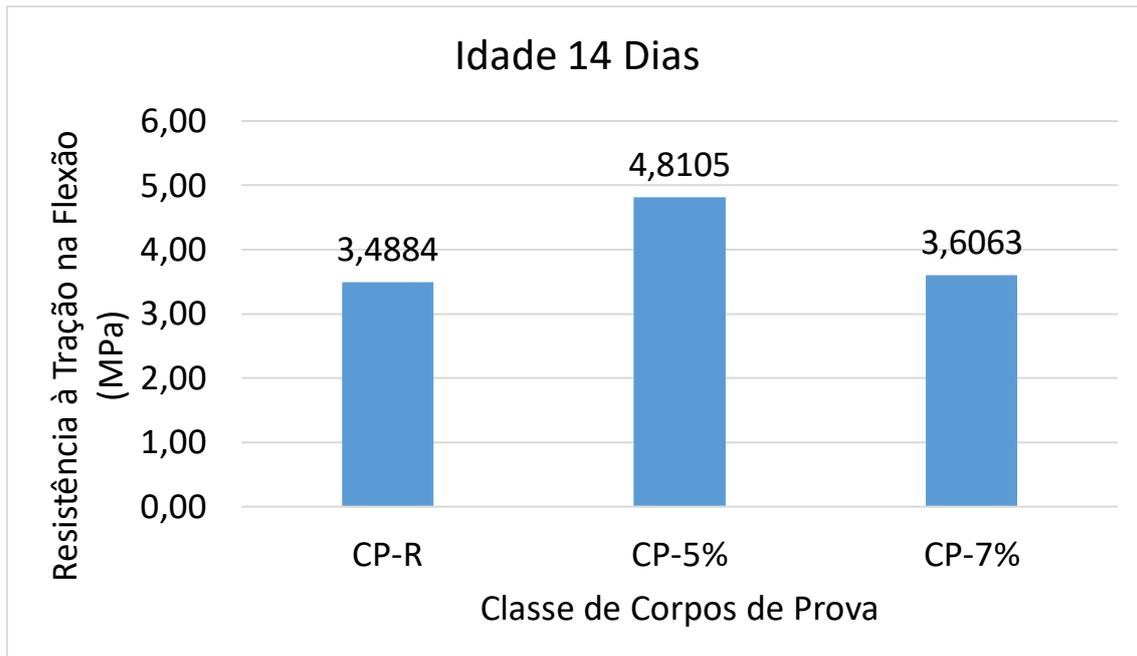


Fonte: O Autor (2020)

4.5 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO

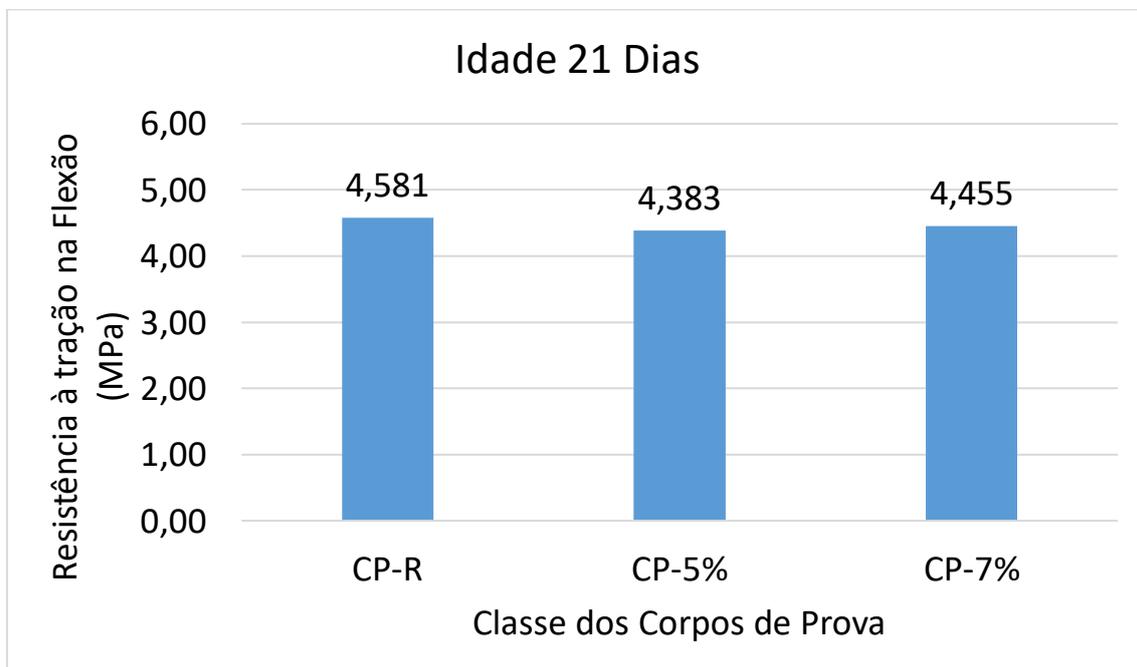
É possível observar os valores individuais dos corpos de prova utilizados para cada traço dos resultados obtidos no ensaio de tração na flexão. Os dados demonstram que há uma pequena queda na resistência com a inserção do resíduo no concreto, que não compromete o ensaio, nos corpos de prova de 21 e 28 dias pode-se observar que os CP-Rs possuem maior resistência a tração na flexão. Quando observa-se cada grupo ao longo do tempo de cura também observa-se um crescimento no perfil de resistência, este crescimento não difere muito entre os grupos e o crescimento aproximado de 20% antes das idades de 14 e 21 dias e 10% entre as últimas duas datas para o corpo de prova de referência, já nos corpos de prova com substituição de 5% de do agregado observa-se uma queda de aproximadamente 9% na resistência entre as idades de 14 e 21 dias e em seguida um crescimento de 3% do dia 21 até o dia final da cura do concreto. Nos corpos de prova substituídos em 7% entre as duas primeiras idades do concreto o ensaio apontou um crescimento de cerca de 20% e nas últimas datas de realização do ensaio uma regressão de 5. Apesar de ter havido uma diminuição da resistência à tração, nota-se que os valores são muito aproximados. As figuras 29, 30 e 31 mostram os valores obtidos no ensaio de tração na flexão, e as figuras 32, 33 e 34 a comparação do carregamento em relação as idades do concreto.

Figura 29 - Resultados do ensaio de tração na flexão aos 14 dias



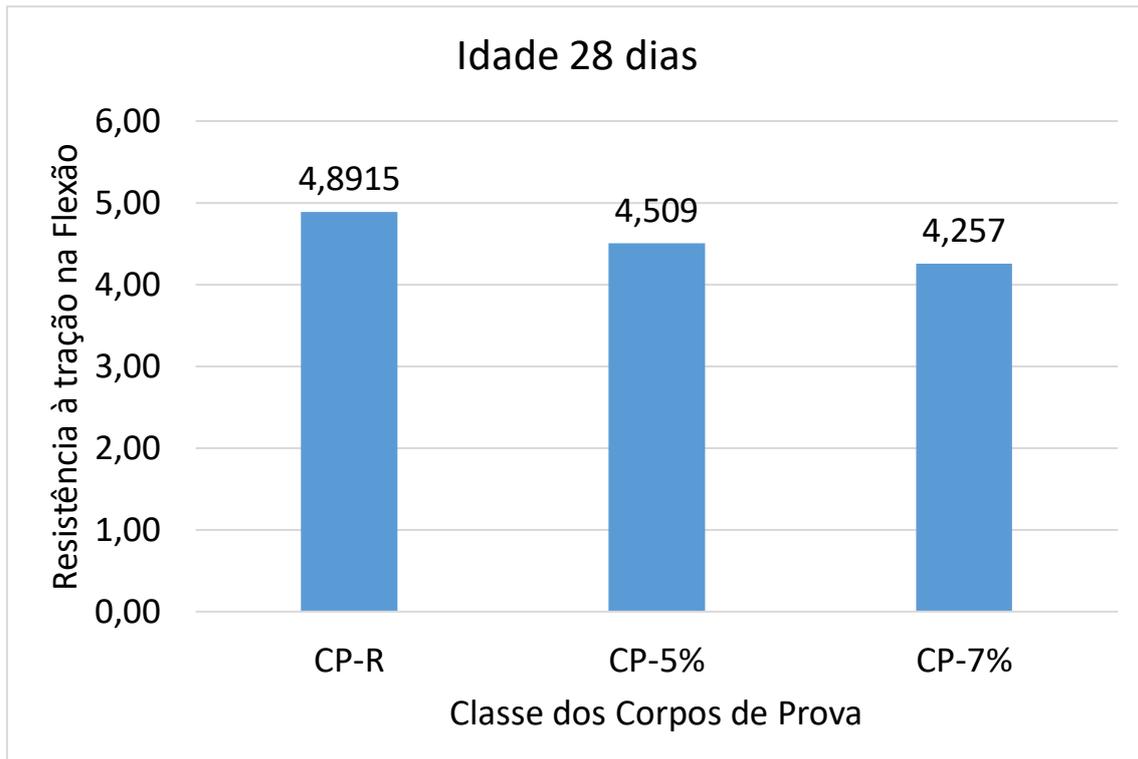
Fonte: Autor (2020)

Figura 30 - Resultados do ensaio de tração na flexão aos 21 dias



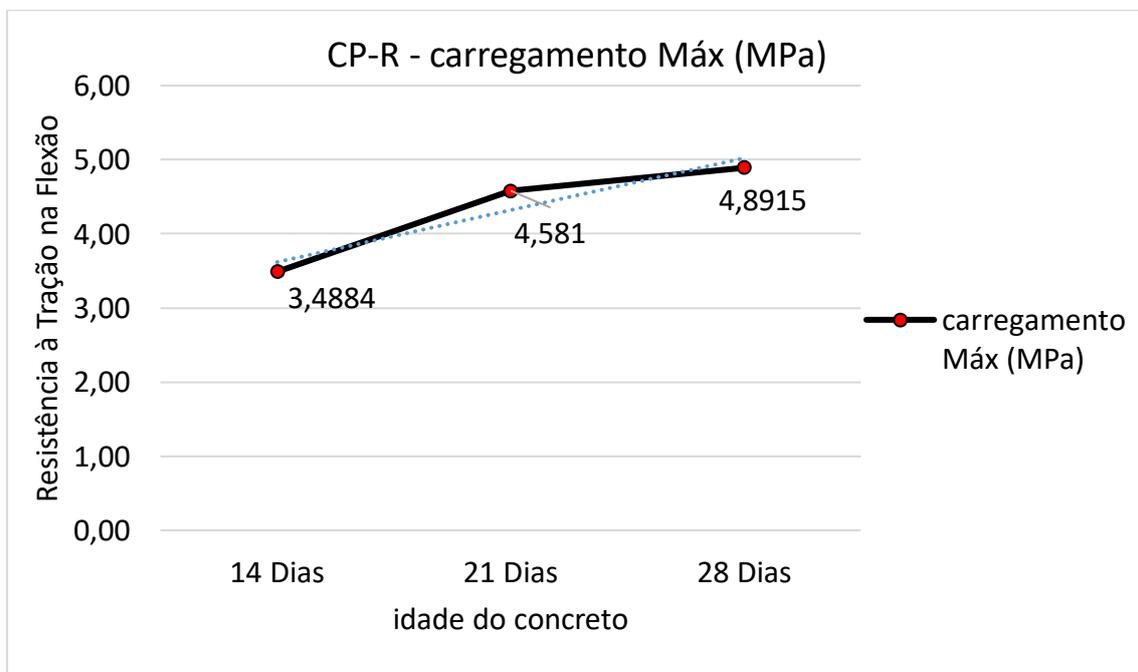
Fonte: Autor (2020)

Figura 31 - Resultados do ensaio de tração na flexão aos 28 dias



Fonte: Autor (2020)

Figura 32 - Carregamento x idade, Ensaio de Tração na Flexão



Fonte: Autor (2020)

Figura 33 - Carregamento x idade, Ensaio de Tração na Flexão

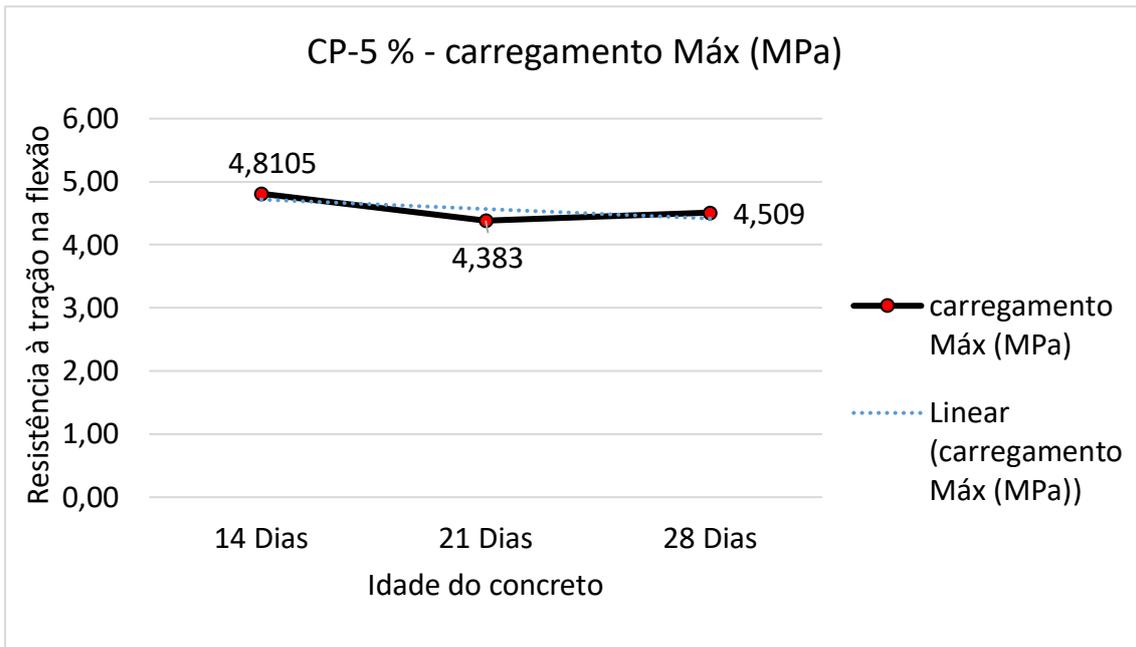
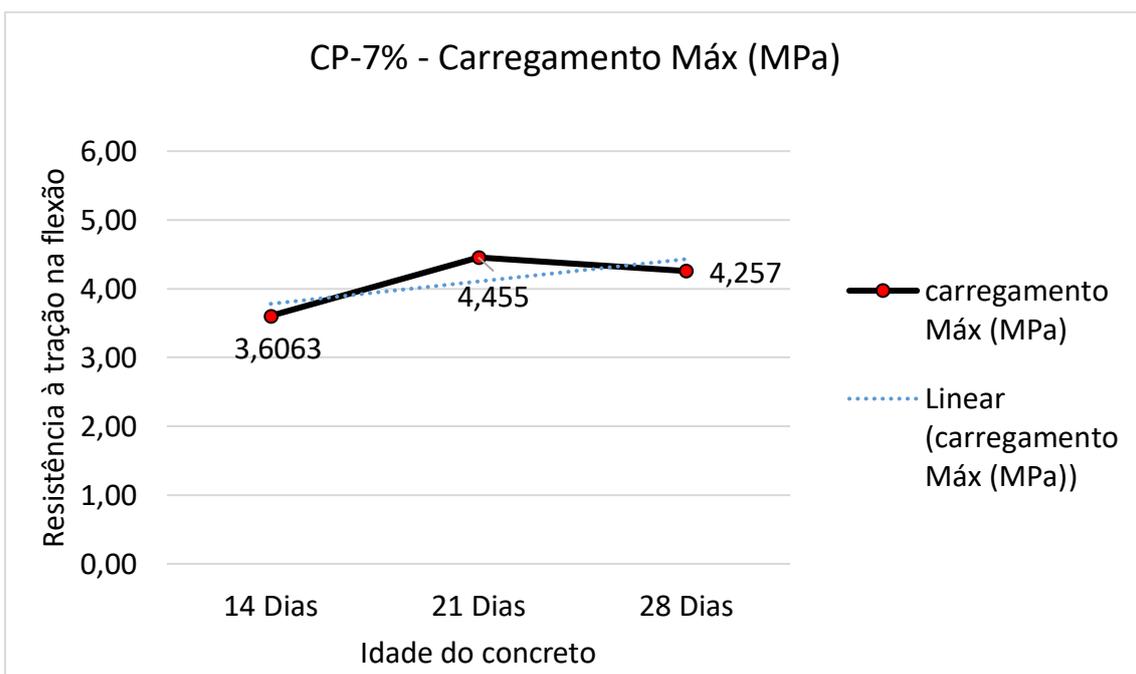


Figura 34 - Carregamento x idade, Ensaio de Tração na Flexão



4.6 Sugestões para trabalhos futuros

- Análise de concretos com resíduos: diferenças entre a adição e substituição do resíduo de borracha;
- O estudo do fator água cimento em concretos com resíduo de borracha;
- Concreto com resíduos de borracha de recauchutagem na aplicação em pavimentos rígidos;
- Análise comparativa de concretos com resíduos de borracha em fibras e resíduos triturados.

5 CONCLUSÃO

Sustentabilidade é o mais moderno e atual conceito empregado para a construção civil, é comum na comunidade acadêmica sobre tudo na engenharia de materiais a busca por aprimoramento de materiais e processos que tornem a construção civil cada vez mais sustentável, visto que essa é uma das áreas que mais se favorece de recursos naturais para ser desenvolvida, desse modo nada mais justo que torna-la cada vez mais ambientalmente correta. Neste trabalho foi visto que a utilização de resíduos de pneus de borracha de recauchutagem é uma maneira de reduzir o volume deste material na natureza, reutilizando este material em elementos pré-fabricados de concreto não estrutural, dando um destino ambientalmente correto.

De acordo com os resultados obtidos na caracterização do resíduo de borracha, fica claro que a utilização da borracha média é ideal para a utilização em concretos de baixa exigência estrutural, uma vez que a trabalhabilidade do concreto é afetada pelo tamanho dos grãos de borracha. De acordo com os resultados obtidos na caracterização dos agregados, as curvas mostram que tanto a areia (agregado miúdo) como o seixo (agregado graúdo) estão dentro dos padrões de normalidade do Módulo de finura. E que o emprego deste material na pesquisa é válido. Levando em consideração claro a trabalhabilidade do concreto que pode ser alterada pelo diâmetro dos grãos de areia e o seixo que possui resistência menor comparada a brita.

Pelo resultado do *slump test* a dosagem de concretos com resíduos de borracha deve ser mais profundamente estudada. É importante fazer o uso de aditivos para não intervir no fator água cimento uma vez que a borracha já reduz a resistência a compressão da amostra. Os ensaios de compressão axial mostram que há uma correspondência inversa

entre a quantidade de fibra incorporada ao concreto e a resistência a compressão das amostras, isso se dá ao fato que a borracha por ser um elastômero não cria uma superfície de aderência tão boa capaz de resistir aos esforços comprimidos. O que não impede o concreto ser utilizado em elementos não estruturais como o meio fio.

A substituição parcial da areia faz com que os elementos pré-fabricados sejam mais leves e sejam mais resistentes a abrasão. Entretanto a principal característica do concreto com resíduo é a retirada desse material da natureza de maneira ambientalmente correta sem criar novos agentes agressores. Dessa forma a pesquisa mostra viável a substituição dos agregados nos elementos de concreto não estruturais existentes na construção civil. O que faz o caráter ambiental da pesquisa ressaltar a importância de se criar normas ou leis para incentivar a retirada desse resíduo da natureza e dar uma destinação que não apresente danos ao meio ambiente.

De acordo com a especificação de projeto contida na NORMA DNIT 020/2006 – ES o meio-fio deve ser baseado em um concreto de F_{ck} 15 MPa, ou seja, mesmo com perdas de resistência o concreto utilizado para a fabricação do meio-fio se adequa aos padrões do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes podendo ser utilizado em vias para a contenção de águas de drenagem superficial.

REFERÊNCIAS

- ABR - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO SEGMENTO DE REFORMA DE PNEUS. **Dados do segmento**. 2017. Disponível em: <<http://www.abr.org.br/dados.html>>. Acesso em: 21/09/2019.
- ALBUQUERQUE, A.C. **Estudo das Propriedades de Concreto Massa com Adição de Partículas de Borracha de Pneu**. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFRGS, Porto Alegre, 2009.
- ALBUQUERQUE, A. C, et al.,. **Adição de borracha de pneu ao concreto convencional e compactado com rolo**. In: Anais do ENTAC. 2006.
- ALBUQUERQUE, A. C, et al., . **Concreto com borracha de pneu: uma revisão bibliográfica**. Anais do 43º Congresso Brasileiro de Concreto, IBRACON. Foz do Iguaçu, 2001.
- AKASAKI, J.L., NIRSCHL, G.C., FIORITI, C.F. **Análise experimental da resistência à compressão do concreto com adição de fibras de borracha vulcanizada**. Anais do 43º Congresso Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu. 2001.
- AKASAKI, J.L., SERNA ROS, P., REYES, B., TRIGO, A.P.M. **Avaliação da Resistência à flexão do concreto com borracha de pneu com relação ao concreto convencional**. Anais do 45º Congresso Brasileiro do Concreto, Vitória, 2003
- ALBANO, C., CAMACHO, N., REYES, J., FELIU, J.L., HERNANDEZ, M. *Influence of scrap rubber edition to Portland I concrete composites: destructive and non-destructive testing*. Composites Structures, vol. 71, pp. 439-446, 2005.
- AL-MASHHADANI, J.. **Physical properties and impact resistance of rubber tyre waste concrete**. Faculty of Civil Engineering – Military Collage of Engineering, Baghdad, 2001.
- ALTOÉ, Silvia Paula Sossai. **Avaliação da resistência mecânica de pavers fabricados com resíduos de pneus em substituição parcial do agregado miúdo**. Artigo científico, In: Syn. scy. UTFPR, Pato Branco, v. 12, n. 1, p. 262–268, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C293. **Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)**. USA, West Conshohocken, Pennsylvania, 2016.
- ANDRIETTA, Antônio J. **Pneu e meio ambiente: um grande problema requer uma grande solução**. 2002. Disponível em: <<http://www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br/recipientes.htm>>. Acesso em: 02 set. 2019.
- ANIP -ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE INDÚSTRIAS DE PNEUMÁTICOS. Disponível em: <www.anip.com.br>. Acesso em: 05 out. 2019.
- ARAÚJO, Felipe Costa; SILVA, Rogério José da. **Pneus inservíveis: análise das leis ambientais vigentes e processos de destinação final adequados**. Porto Alegre: ENGEP, 2005. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEgEP2005_Enegep1004_1123.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2020.

ARAUJO NETO, A.M., COSTA, M.V.S., GONÇALVES JR,P.P.B. SOUZA, P.S.L. **Avaliação da substituição parcial do Agregado Miúdo por Raspa de Pneu, para concretos feitos em Belém – PA.** Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto. Rio de Janeiro, CBC0086, pp.1-16, 2006

ASHBY, M.F.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D. **Materiais: Engenharia, ciência, processamento e projeto.** Editora Elsevier, 2ª ed. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto.** Rio de Janeiro, 2007. 98

_____.NBR 7222: **Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2011.

_____.NBR 9781: **Peças de concreto para pavimentação – Especificação e método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.

_____.NBR 8522: **Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação e da curva tensão deformação.** Rio de Janeiro, 2017.

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

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

_____. NBR 5738: **Procedimento para Moldagem e Cura dos Corpos de Prova.** Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR5739: **Concreto – Ensaio de compressão de corpo de prova cilíndrico -.** Rio de Janeiro, 2007.

_____.NBR 7207: **Terminologia e classificação de pavimentação.** Rio de Janeiro, 1982.

_____.NBR 10.004: **Resíduos Sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2004

_____.NBR 10.006: **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

_____.NBR 10.007: **Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

_____.NBR 12655: **Preparo, controle e recebimento de concreto.** Rio de Janeiro, 1992.

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

_____.NBR: NM 52: **Agregado miúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

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

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

_____.NBR: NM 248: **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio

de Janeiro, 2003.

BAUER, R.J.F., TOKUDOME, S., GADRET, A.D. **Estudo de Concreto com pneu moído**. Anais do 43º Congresso Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu. 2001.

BERTOLLO, S. A. M. et al., **Pavimentação Asfáltica, 2000: uma alternativa para reutilização de pneus usados**. Revista Limpeza Pública, nº. 54. Associação Brasileira de Limpeza Publica – ABLP, p. 23-30.

BEUMERINK, P. J. H.; JANSSEN, M. **A trade and recycling of used tyres in Western and Eastern Europe**. Resources, conservation and Recycling, n.33, p.235-265, June 2001

BNDES: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Pneus**. BNDES: Áreas de Operações Industriais 2/ Gerência Setorial 2. Junho, 1998.

BRANCO, J. E. H. et al., **Caracterização da Logística Reversa de Pneus Inservíveis**. In: Logística Ambiental de Resíduos Sólidos. São Paulo: Atlas, 2011. 99

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **CONAMA nº 258**. Resolução nº 258 de 26 de agosto de 1999.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **CONAMA nº 258**. Resolução nº 258, de 26 de agosto de 2009.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **CONAMA nº 369**. Resolução nº 369, de 28 de Março de 2006.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **CONAMA nº 416**. Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009.

BRAZIL TIRES, **Tudo sobre pneus**. Disponível em: <www.geocities.ws/unicariguatu/CONHECAOSPNEUS.html> Acessado em: 21 set de 2019.

BRITO, Gabriela do Prado Sá. **Estudo da Viabilidade Técnica de Paver com Resíduo de Pneu em Substituição Parcial dos Agregados**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2013.

CALLISTER, W. D. Jr.. **Ciência e engenharia de materiais – uma introdução**. Utah: LTC, 2002.

CEMPRE. **Mercado para Reciclagem**. Disponível em: <http://cempre.tecnologia.ws/fichas_tecnicas.php?lnk=ft_pneus.php>. Acesso em: 02 out. 2017.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. **Metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

COUTINHO, J S. **Agregados para Argamassas e Betões. Materiais de Construção 1**. Lisboa-Portugal, 1999.

CRIPA, B. H. S. da. et al., **Vulcanização da Borracha Natural com Enxofre**. Artigo

científico, 2013.

EPPS, J. A. *Uses of Re-cycled Rubber Tires in Highways*. In: NCHRP SYNTHESIS, 198. Washington: TRB, National Research Council, 1994, 162 p.

FATTUHI, N. I; CLARK, L. A.. *Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber Construction and Building Materials*, 10(4), 1996. pp. 229-236.

FIORITI, C.F. et al., . **Pavers de concreto com adição de resíduos da recauchutagem de pneus. In: ambiente construído**, Porto Alegre, v.1, n.1, p.63-74, out. /dez. 2006.

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. In: ambiente Construído**, Porto Alegre, v.7, n.4, p.43-54, out. /dez. 2007. 100

FREITAS, C.. **Estudo do Desempenho mecânico de Concreto com Adição de Partículas de Borracha para Aplicação como Material de Reparo em Superfícies Hidráulicas: Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná – Curitiba, 2007.**

GOMES F. C. V., **Levantamento do Potencial de Resíduos de Borracha no Brasil e Avaliação de Sua Utilização na Indústria da Construção Civil**. Tese de Mestrado - IEP, Curitiba, PR, Brasil, 2007.

GOTO, A.K.; SOUZA, M.T.S.. **A Contribuição da Logística Reversa na Gestão de Resíduos Sólidos: uma Análise dos Canais Reversos de Pneumáticos**. In: XXXI Enanpad, Rio de Janeiro, Anais...Rio de Janeiro, 2008, CD-ROM.

GRANZOTTO, Laura. **Concreto com adições de borracha: uma alternativa ecologicamente viável**. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós - Graduação em Engenharia Urbana, Maringá, 2010.

HUYNH, H., RAGHAVAN, D., FERRARIS, C.F. *Rubber particles from recycled tires in Cementitious Composite Materials*, Department of Chemistry, Howard Huniversity, Washington, pp. 1-18, 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Resolução Conama nº 235 de 1996 .

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS: Resolução Conama nº 258 de 1999 .

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatório de pneumáticos**: Resolução Conama nº 416/09: 2017 (ano base 2016).

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatório de pneumáticos**: Resolução Conama nº 416/09: 2019 (ano base 2018).

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Pneus novos e reformados**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/imprensa/releases/pneusrefor.asp>>. Acesso em: 09 jul.

2019.

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Reciclagem**. IPT Notícias, v.7, n.38, maio/junho, p.1 1995.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Livre Docência)– Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2000.

KAMIMURA, E. **Potencial de Utilização dos Resíduos de Borracha de Pneus pela Indústria a Construção Civil**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

KORMANN, A.C.M.. **Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da UFPR. Curitiba, 2002.

KROTH, L.A.. **Análise mecânica e química de placas pré-moldadas de concreto com adição de resíduo de borracha de pneus**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2012.

LACERDA, L. **Logística reversa: uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais**. Rio de Janeiro: COPPEAD, 2002. Disponível em: <http://www.ilos.com.br/site/index.php?option=com_content&task=view&id=763&Itemid=74>. Acesso em: 28 out. 2017.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S.. **Tecnologias Utilizadas para a Reutilização, Reciclagem e Valorização Energética de Pneus no Brasil**. Polímeros: Ciência e Tecnologia. São Paulo, v. 18, n 2, p. 106-118, 2008. 101

LEITE, P. R. **Logística reversa: meio ambiente e competitividade**. São Paulo: Prentice Hall, 2003

LIMA, I.S., ROCHA, F.S., FERREIRA, J.B. **Um estudo da argamassa de cimento com adição de fibras de borracha vulcanizada para construção civil**. Anais do 42º Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza. 2000.

LINTZ, Rosa Cristina Cecche.; GACHET-BARBOSA, Luísa Andréia. **Avaliação do comportamento de concreto contendo borracha de pneus inservíveis para utilização em pisos intertravados**. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. São Paulo, 2010.

LUND, H. F. **The McGraw Hill recycling handbook**. New York: McGraw-Hill, 1993. Chapter 18.

MARTINS, I.R.F. **Concreto de Alto Desempenho com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu**. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2005.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, 3ª Edição. Ed. IBRACON, 2008.

MONTEIRO, M. A.; MATTIOLI, L. M. L.; FERREIRA, R. H. **PGIRPN (Plano de gerenciamento integrado de resíduos pneumáticos)**. FEAM: Fundação Israel Pinheiro- 2. ed. Belo Horizonte, 2011.

MOREIRA, J.F.; FIDELIS, V.R.P.; DIAS, J.F.. **Concreto com borracha de pneus aplicado em ciclovia**. In: HOLOS Environmental, v. 14, n. 2, 2014 – p.186.

MORILHA JR., A.; GRECA, M. R.. **Considerações Relacionadas ao Asfalto Ecológico – Ecoflex**. IEP, Apostila sobre Asfalto Borracha, Instituto de Engenharia do Paraná. 2003.

NEVILLE, A.M..**Propriedades do concreto**. 2ª Ed. São Paulo. PINI, 1997.

NEVILLE, A.M..**Tecnologia do Concreto**, Ed. Bookman, 2013.

NOVICK, R. E. M.; MARTIGNONI, B. N. V. & Paes, E. - "**Retortagem de Pneus**" , in: Anais do Seminário Nacional sobre Reuso e Reciclagem de Resíduos Sólidos – SMA, 11p., Rio de Janeiro, agosto (2000).

ODA, S.; FERNANDES Jr, J. L. **Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação**. Acta Scientiarum, Maringá, v. 23, n. 6, p. 1589-1599, 2001.

OLIVEIRA, Caroline; Menegotto, Mauro Leandro. **Utilização de Resíduos de Borracha de Pneu Na Confecção de Blocos de Concreto Para Pavimentação**. Artigo científico, In: Anais do SEPE – Seminário de Ensino, Pesquisa e Extensão da UFFS. Vol. IV, 2014.

OLIVEIRA, O. J. de., CASTRO, R.de.. **Estudo da destinação e da reciclagem de pneus inservíveis no Brasil**, In: XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 239-57, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 09 a 11 de outubro de 2007.

PARRA, C. V.; NASCIMENTO, A. P. B. do; FERREIRA, M. L..**Reutilização e Reciclagem de pneus, e os problemas causados por sua destinação incorreta**. Disponível em: <http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2010/anais/arquivos/0908_0988_01.pdf>. Acesso em: 21 set. 201.

PIT & QUARRY. *Life after demolition*. v. 83, n. 1, p. 38-40, 42, jul. 1990

PNEWS, Revista nº, 34. **Associação Brasileira dos Recauchutadores, Reformadores e Remoldadores – ABR**. 2013.

QUEIROZ, R. M. **Tubos de concreto com adição de resíduos de borracha de pneu**. 2012. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

RAMOS, L. S. N. F. **A logística reversa de pneus inservíveis: o problema da localização dos pontos de coleta**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

RESCHNER, K. *An overview of commercially available scrap tire processing and*

rubber recycling methods. Disponível em: <<http://home.snafu.de/kurtr/str/en.html>> Acesso em 30 JUL. 2019.

RECICLOTECA. **Centro de Informações sobre reciclagem e meio ambiente. Borracha e o pneu**, 2009. Disponível em:<<http://www.recicloteca.org.br/Default.asp>>. Acesso em: 18 de jun. 2019.

RESENDE, E..**Canal de Distribuição Reverso na Reciclagem de Pneus: Estudo de Caso**. Dissertação de Mestrado - Pontifca Universidade Católica. Rio de Janeiro. 2004.

RIBEIRO, Cléa Maria da Cunha. **Gerenciamento de pneus inservíveis: Coleta e destinação final**. Dissertação. Mestrado. Centro Universitário Senac. São Paulo. 2005

REQUERIMENTO DA COMISSÃO DE MEIO AMBIENTE, nº 48, de 2009

RODRIGUES J. M. R. P.; FERREIRA, O. P.; CLARETO N. S. **Aproveitamento de borracha de pneus inservíveis na produção de componentes para construção**. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, 2004, Florianópolis, SC. Anais... Florianópolis, SC: ICTR, 2004.

ROGERS, D. S.; TIBBEN-LEMBKE, R. S. *Going backwards: reverse logistics, trends and practices*. Reno: Center for Logistics Management, 1999

ROMUALDO, A. C. A. et al., . **Pneus Inservíveis como Agregados na Composição de Concreto para Calçadas de Borracha**. In: 3 International Workshop | Advances in Cleaner Production São Paulo – Brazil – May 18th-20th - 2011

SANTOS, Luiz Eduardo Mateus dos. **Estudo de Estrutura Pré-Moldada com Adição de Resíduo de Pneu**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará. Belém – PA, 2016. 103

SANTOS, A. C. **Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneus com aplicação em placas prêmoldadas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Alagoas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Maceió, 2005.

SANTOS, L. de A. A.; BOTINHA, R. A.; LEAL, E. A.. **A Contribuição da Logística Reversa de Pneumáticos para a Sustentabilidade Ambiental**. Artigo científico, 2010 - IN: VII Convibra Administração – Congresso Virtual Brasileiro de Administração .

SILVA, F. M. da.; VAZ, V.V.; BARBOSA, L.A.G.; LINTZ, R.C.C. **Avaliação da resistência mecânica de pisos intertravados de concreto sustentáveis (PICS)**. Artigo científico, In: revista Matéria, v.22, n.1, 2017.

SILVA, Fabiana Maria da. **Análise da Aplicação de Resíduo de Borracha de Pneus Em Piso Tátil Intertravado de Concreto**. Dissertação de Mestrado -Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2014.

SILVA, JR. Francisco Alves Da. **Avaliação do efeito da adição de resíduo de borracha de pneu e brita calcária na formulação de compósitos cimentícios**. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2014.

SILVA, Luzilene Souza. **Concreto Alternativo com Utilização de Resíduos de**

Borracha de Recauchutagem de Pneus para Elementos e Componentes Pré-fabricados. Dissertação de Mestrado – Instituto Federal do Pará. Belém, 2018

SINDIPNEUS. Disponível em: <http://www2.sfiiec.org.br/portal/sindipneus/>. Acesso em: 22/01/2020.

SOUZA, Renata Tatiana. **Análise da logística reversa de pneus usados e inservíveis e seus impactos ambientais quando descartados Inadequadamente.** Monografia. Tecnólogo em Logística. Faculdade de Tecnologia da Zona Leste. São Paulo, 2009

SOUZA, Fábio Santos de. **Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de concreto utilizando resíduo de recapagem de pneus.** Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA). Belém-PA, 2016.

SOUZA, F.S de. et al., . **Fratura do concreto com resíduos de pneus inservíveis.** Artigo científico. In: Anais da 59ª Edição do Congresso Brasileiro de Concreto, 2017.

SOUZA, M. T. S. **Organização sustentável: indicadores setoriais dominantes para a avaliação da sustentabilidade – análise de um segmento do setor de alimentação.** 2000. 139 f. Tese (Doutorado) – Escola de Administração de Empresas, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2000.

TAHA, M.M.R. et al., . *Mechanical, fracture, and microstructural investigations of rubber concrete.* *J Mater Civil Eng.*, 2008; 20:640-9.

TOPÇU, I. B. *Assesment of the britleness index of rubberized concretes.* *Cement and Concrete Research*, vol 27, nº 2, pp. 177-183, 1997.

TOPÇU, B. I. *The properties of rubberized concretes.* *Cement and Concrete Research*, vol. 25, no. 2, 1995, 304-310 p. 104

TRETIN, T. F. S. **Análise estrutural de tubos de concreto armado com resíduo de borracha de pneu.** Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira. São Paulo, 2014.

TRIGO, A. P. M. **Estudo de lajes com adição de resíduo de pneu.** 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista Ilha Solteira, 2005.

VAN VLACK, L.. **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais.** Editora Campos Ltda., Rio de Janeiro, 4ª Ed. 1984.

VIEIRA, Ana Paula Nascimento Batista. **Viabilidade técnica da fabricação de compósito utilizando fibra de pneu na fabricação de blocos intertravados.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2014.

YILMAZ, A; DEGIRMENCI, N. *Possibility of using waste tire rubber and fly ash with Portland cement as construction materials.* *Waste Management*, v. 29, n. 5, p. 154-1546, 2009.

ZHENG, L.; HUO, X. S.; YUAN, Y. *Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete.* *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v. 22, p. 939 - 947, 2008.

TEODORO, S. B. **Avaliação do uso da areia de britagem na composição do concreto estrutural**. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora, 2007.

VIERO, E. H. **Aplicação da areia de britagem de rochas basálticas na fabricação de concreto de cimento Portland**. Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em materiais da Universidade de Caxias do Sul, 2010.