

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

CONCRETO ALTERNATIVO COM UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE
BORRACHA DE RECAUCHUTAGEM DE PNEUS PARA ELEMENTOS
E COMPONENTES PRÉ-FABRICADOS

Luzilene Souza Silva

BELÉM – PARÁ - BRASIL

2018

**CONCRETO ALTERNATIVO COM UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BORRACHA
DE RECAUCHUTAGEM DE PNEUS PARA ELEMENTOS E COMPONENTES PRÉ-
FABRICADOS**

Luzilene Souza Silva

Dissertação de Mestrado 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: Prof. Dr. Laércio Gouvêa Gomes.

BELÉM – PARÁ - BRASIL

2018

Dados para catalogação na fonte
Setor de Processamento Técnico
Biblioteca IFPA - Campus Belém

S586c Silva, Luzilene Souza.

Concreto alternativo com utilização de resíduos de borracha de recauchutagem de pneus para elementos e componentes pré-fabricados. – [manuscrito] / Luzilene Souza Silva. – Belém, 2018.

104pf.

Impresso por computador (Fotocópia).

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais - Mestrado Profissional, Belém, 2018.

Orientador: Laércio Gouvêa Gomes.

1. Resíduos. 2. Pneus. 3. Passivo ambiental. 4. Pavimentos. 5. Concreto com borracha. I. Título.

CDD: 620.118

Bibliotecária Simone Nazaré da Silva Coutinho - CRB/875

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

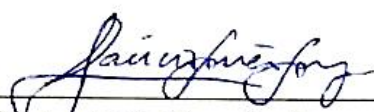
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CONCRETO ALTERNATIVO COM UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE
BORRACHA DE RECAUCHUTAGEM DE PNEUS PARA ELEMENTOS
E COMPONENTES PRÉ-FABRICADOS

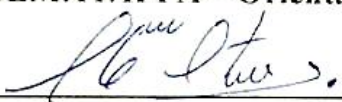
Autor: Luzilene Souza Silva

Orientador: Prof. Dr. Sc. Laércio Gouvêa Gomes

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo APROVA esta Dissertação:



Prof^o Dr. Sc. Laércio Gouvêa Gomes, Presidente
(PPGEMAT/IFPA – Orientador)



Prof^o Dr. Sc. Oscar Jesus Choque Fernandez
(PPGEMAT/IFPA – Membro Interno)

Prof^o Dr. Sc. Marcelo de Souza Picanço
(PPGEC/ITEC/UFPA – Membro Externo)

Prof^a Dr^a Sc. Verônica Scarpini Candido
(PPGEP/ITEC/UFPA – Membro Externo)

Belém (PA), 28 de MAIO de 2018.

"Dedico a conquista dessa vitória a Deus, por me dar vida e saúde, e à memória dos meus pais (Mário Matos da Silva e Mariana Souza Silva), e da minha avó (Luiza Melo de Souza), com todo meu amor e gratidão".

(Luzilene Souza Silva).

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a todos os anjos que passaram por minha vida, em especial, aos meus pais, que me escolheram pra ser amada e cuidada por eles e a minha querida vizinha, que tanto me amou e me fez feliz. Não poderia ter sido presenteada com anjos melhores! Obrigada por tudo!

Agradeço aos meus professores, pelo compartilhamento desse bem tão precioso que é o conhecimento. Ao meu orientador (Laércio Gouvêa Gomes), e aos membros da minha banca (Oscar Jesus Choque Fernandez, Marcelo de Souza Picanço e Verônica Scarpini Candido), por suas orientações neste trabalho.

Agradeço a todos que ajudaram na parte experimental da dissertação, meus colegas de curso (Ribamar Mouta, Marília Cristina e Welton Raiol) e também ao Rodrigo Oliveira, por todo o seu apoio. Aos professores (Marcelo de Souza Picanço e Mike Pereira da Silva) por terem cedido espaço no laboratório da UFPA para realização dos ensaios necessários, e aos técnicos (Rafael, Joel e Karolina) por sua receptividade e assistência.

Por fim, não poderia deixar de agradecer ao meu melhor amigo, que hoje representa a minha família, Sergio Luiz dos Santos Pereira. Obrigada por tudo que você fez e faz por mim! Obrigada pelos cuidados, conselhos e pelos sorrisos que você me proporciona diariamente, sem o seu apoio e amor eu não teria conseguido. Você é mais um dos anjos que Deus colocou em minha vida para me fazer feliz. Meu amor por você é maior que o amor que você sente pelo Flamengo.

EPÍGRAFE

"Em algum lugar, alguma coisa incrível está esperando para ser descoberta".

(Carl Sagan).

RESUMO

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 de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará - IFPA/Campus Belém, Belém - Pará, 2018. 107 p.

Os pneus inservíveis constituem um passivo ambiental de difícil descarte, tanto pela demora em se decompor quanto por seu grande volume. Sua disposição inadequada gera danos ao meio ambiente e favorece a proliferação de vetores que causam doenças nos seres humanos. A indústria de recauchutagem se destaca no prolongamento da vida útil de pneumáticos, mas o volume de resíduos gerados nesse processo aumenta como consequência. A utilização de resíduos provenientes de processos industriais tais como a recauchutagem vem crescendo no cenário mundial como uma alternativa no reaproveitamento de materiais. Com o intuito de contribuir para a logística reversa dos pneus inservíveis, o presente trabalho visa avaliar a influência da incorporação de diferentes proporções de resíduos de borracha de recauchutagem de pneus (teores de 6% e 9% em massa) em um concreto de composição alternativa, para elementos e componentes pré-fabricados para uso na construção civil. Foram realizados procedimentos experimentais, tais como: caracterização física dos resíduos e dos materiais constituintes do concreto; dosagem e produção do concreto e moldagem dos corpos de prova; ensaios físicos (massa específica, absorção e índice de vazios) e mecânicos (compressão axial e diametral, tração na flexão e módulo de elasticidade), e; análises macroscópicas e microscópicas através de estereoscópio ótico e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), respectivamente. Por fim, foi feita uma avaliação quantitativa do benefício ambiental gerado pelo uso dos resíduos e uma análise dos custos para produção de concreto com borracha. Os resultados mostram que todas as composições analisadas apresentam resistência à compressão axial superiores a 35 MPa e absorção menores que 6%, enquadrando-se nos padrões estabelecidos pela NBR 9781 (ABNT, 2013) para utilização na manufatura de elementos e componentes pré-fabricados. O concreto alternativo com 9% de incorporação de resíduos de pneus apresentou melhora na tenacidade à fratura (aumento de 19,14% em relação ao concreto de referência) e diminuição de 3,04% na sua massa específica. Verificou-se redução de 4% no custo de produção do concreto alternativo. Conclui-se que o concreto com resíduos de recauchutagem de pneus possui viabilidade técnica, econômica e ambiental, sendo possível a aplicação desta tecnologia na produção de peças de pavimentação de qualidade satisfatória, de acordo com os padrões técnicos estabelecidos.

Palavras Chave: Resíduos. Pneus. Passivo Ambiental. Pavimentos. Concreto com Borracha.

ABSTRACT

Unserviceable tires represent an environmental passive of difficult final disposition, both because of their big volume and because of their lengthy decomposition. Discarding them inadequately causes important damages to the environment and favors the proliferation of vectors of human diseases. The retreading industry is key to extend the service life of pneumatics, but the volume of waste generated in this process increases as a consequence. The use of waste from industrial processes such as tire retreading has seen a rise as an option for the reutilization of materials. In order to contribute to the reversal logistics of unserviceable tires, this work aims at evaluating the influence of the incorporation of different proportions of tire retread rubber waste (6 wt% and 9 wt%) in a concrete of alternative composition to be used in prefabricated elements and components applied in construction. The experimental procedures conducted include: physical characterization of the residues and other materials in the mixes; determination and production of concrete mixes and confection of specimens; physical (specific weight, absorption and voids content) and mechanical tests (axial compressive strength, diametric compressive strength, tensile strength and elasticity modulus), and; macroscopic and microscopic analysis with the utilization of stereoscope and Scanning Electron Microscope (SEM). Finally, a quantitative assessment of the environmental benefits of the use of the residue was elaborated, as well as an analysis of the costs of manufacturing a concrete with rubber. The results showed that all the mixes analyzed present axial compressive strength higher than 35 MPa and absorption lower than 6%, in accordance to the guidelines of NBR 9781 (ABNT, 2013), for the use in the manufacture of prefabricated elements and components. The concrete with 9 wt% of incorporated rubber residue presented an increase in the crack resistance (19.14% when compared to the reference mix) and a decrease of 3.04% in its specific weight. The manufacture costs were 4% lower than those of regular concrete. From the analysis, the technical, economic and environmental viability of this alternative has been established, being it useful in the manufacture of paving elements of satisfactory quality according to the most accepted technical standards.

Key-words: Waste. Tires. Environmental Passive. Paving. Concrete With Rubber.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química média de um pneu	26
Tabela 2. Comparação dos materiais contidos em pneus	26
Tabela 3. Quantidade média de resíduos de borracha gerados por pneu no processo de recauchutagem.	38
Tabela 4. Valores encontrados para massa específica e unitária na literatura pesquisada.	42
Tabela 5. Relatório de ensaios químicos do cimento	54
Tabela 6. Relatório de ensaios físicos do cimento.....	55
Tabela 7. Consumo de materiais para 1m ³ de concreto.....	63
Tabela 8. Descrição do total de corpos de prova produzidos	65
Tabela 9. Distribuição granulométrica do seixo	75
Tabela 10. Distribuição granulométrica da areia.....	76
Tabela 11. Distribuição granulométrica do resíduo de borracha.....	76
Tabela 12. Massa unitária e específica dos agregados	79
Tabela 13. Resultados dos ensaios de compressão axial simples.....	80
Tabela 14. Resultados dos ensaios de tração indireta por compressão diametral	81
Tabela 15. Resultados dos ensaios de tração na flexão	83
Tabela 16. Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.....	85
Tabela 17. Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica	87
Tabela 18. Resultados da espectroscopia de dispersão de energia	92
Tabela 19. Análise quantitativa do benefício ambiental gerado pelo uso de borracha de pneu de recauchutagem para produção de concreto.....	93
Tabela 20. Avaliação de custos	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Constituição do pneu.....	24
Figura 2. Total de vendas de pneus 3º trimestre (milhões de unidades)	27
Figura 3. Produção de pneus (milhões de unidades)	28
Figura 4. Ciclo de vida dos pneumáticos.....	29
Figura 5. Pontos de coleta de pneus inservíveis declarados por estado (2016).....	29
Figura 6. Produtos fabricados a partir da reutilização dos resíduos de pneus.....	31
Figura 7. Passivo ambiental.....	33
Figura 8. Gerenciamento de resíduos sólidos e logística reserva do pneu	35
Figura 9. Processo de recapagem.	36
Figura 10. Processo de remoldagem.....	37
Figura 11. Processo de recauchutagem.	38
Figura 12. Geração dos resíduos.	53
Figura 13. Fluxograma do beneficiamento do resíduo	53
Figura 14. Resíduo de borracha de pneu utilizado	53
Figura 15. Areia utilizada nesta pesquisa	55
Figura 16. Seixo utilizado nesta pesquisa	56
Figura 17. Fluxograma dos procedimentos experimentais.....	57
Figura 18. Sequência do ensaio de granulometria.....	58
Figura 19. Massas retidas em cada peneira do agregado miúdo	59
Figura 20. Massas retidas em cada peneira do resíduo de borracha.....	59
Figura 21. Ensaio da massa específica da areia.....	60
Figura 22. Detalhe do ensaio da massa específica do seixo	61
Figura 23. Procedimento do ensaio da massa específica da borracha.....	61
Figura 24. Fabricação do concreto	63
Figura 25. Procedimento do ensaio pelo abatimento do tronco do cone.....	64
Figura 26. Moldagem (a), Aparência final do concreto (b).....	65
Figura 27. Ensaio de compressão axial	66
Figura 28. Ensaio de compressão diametral	68
Figura 29. Ensaio de tração na flexão	69
Figura 30. Ensaio do módulo de elasticidade.....	70
Figura 31. Ensaio de absorção e massa específica e índice de vazios.....	71

Figura 32. Ensaio de absorção e massa específica e índice de vazios.....	72
Figura 33. Análise macroscópica das amostras com adição de 6% de borracha – aumento de 6.3x	89
Figura 34. Análise macroscópica das amostras com adição de 9% de borracha – aumento de 6.3x	89
Figura 35. MEV da fratura do compósito com 6% de adição	91
Figura 36. MEV da fratura do compósito com 6% de adição – aumento de 20x.....	91
Figura 37. Análise da morfologia do resíduo de borracha de recauchutagem de pneu.....	92

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Tecnologias utilizadas na destinação de pneus inservíveis (Toneladas).....	31
Gráfico 2. Curva de distribuição granulométrica do seixo	77
Gráfico 3. Curva de distribuição granulométrica da areia.....	78
Gráfico 4. Curva de distribuição granulométrica da borracha.....	78
Gráfico 5. Resistência à compressão axial	80
Gráfico 6. Resistência à tração indireta por compressão diametral.....	82
Gráfico 7. Resistência à tração na flexão - 28 dias (MPa).....	83
Gráfico 8. Comparativo entre resistência à tração indireta por compressão diametral e tração na flexão	84
Gráfico 9. Módulo de elasticidade (GPa)	85
Gráfico 10. Massa específica, absorção de água e índice de vazios.....	88

LISTA DE 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
 $D_{máx}$ = Diâmetro Máximo
EDS = Espectroscopia de Dispersão de Energia
 F_{ck} = Resistência Característica do Concreto
 $F_{ckj_{28}}$ = 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

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 JUSTIFICATIVA	20
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo geral.....	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	21
2 REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1 HISTÓRICO DO PNEU.....	23
2.2 CONSTITUIÇÃO E COMPOSIÇÃO DO PNEU.....	24
2.3 PRODUÇÃO E DESTINAÇÃO DOS PNEUS NO BRASIL	27
2.3.1 Impacto ambiental causado pela deposição inadequada dos pneus	32
2.4 LOGÍSTICA REVERSA DOS PNEUMÁTICOS	33
2.5 PROCESSOS DE REFORMA DO PNEU	35
2.5.1 Recapagem	36
2.5.2 Remoldagem.....	36
2.5.3 Recauchutagem.....	37
2.6 BORRACHA DE PNEU DE RECAUCHUTAGEM.....	38
2.6.1 Composição da borracha de pneu.....	39
2.6.2 Granulometria dos resíduos de pneus	40
2.6.3 Massa unitária e massa específica dos resíduos de borracha de pneus	41
2.7 CONCRETO.....	42
2.8 CONCRETO COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEUS.....	44
2.8.1 Propriedades do concreto com resíduo de borracha de pneus.....	47
2.8.1.1 Efeito na massa específica	47
2.8.1.2 Trabalhabilidade do compósito	48
2.8.1.3 Resistência mecânica e ductilidade	48
2.8.1.4 Resistência ao impacto	49
2.8.1.5 Influência da granulometria da borracha de pneu no comportamento mecânico do concreto	50
2.8.1.6 Tratamento do resíduo de borracha de pneu.....	50
3 MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	52

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	52
3.2.1 Resíduo de borracha de pneus.....	52
3.2.2 Aglomerante hidráulico	54
3.2.3 Agregado miúdo.....	55
3.2.4 Agregado graúdo	56
3.2.5 Água	56
3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	57
3.3.1 Caracterização dos Materiais	58
3.3.1.1 Granulometria do agregado graúdo, agregado miúdo e resíduos de borracha	58
3.3.1.2 Massa específica, massa específica aparente e absorção do agregado miúdo.....	59
3.3.1.3 Massa específica, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo	60
3.3.1.4 Massa específica do resíduo de borracha	61
3.3.1.5 Massa unitária do agregado graúdo, agregado miúdo e resíduo de borracha.....	62
3.3.2 Determinação da Dosagem	62
3.3.3 Fabricação do Concreto	63
3.3.4 Ensaio Físicos e Mecânicos.....	66
3.3.4.1 Ensaio de resistência à compressão axial	66
3.3.4.2 Ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral.....	67
3.3.4.3 Ensaio de resistência à tração na flexão em corpos de provas prismáticos	68
3.3.4.4 Ensaio do módulo de elasticidade	70
3.3.4.5 Massa específica, absorção de água e índice de vazios.....	71
3.3.5 Análise da morfologia da superfície de fratura	73
3.3.6 Análise quantitativa do benefício ambiental gerado pelo uso de resíduos de borracha de pneus em concreto.....	74
3.3.7 Análise da viabilidade econômica para produção de concreto com borracha.....	74
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	75
4.2 MASSA UNITÁRIA E ESPECÍFICA	79
4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	79
4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	81
4.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	82
4.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE	85
4.7 MASSA ESPECÍFICA, ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS	86

4.8 ANÁLISE DA MORFOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE FRATURA	88
4.9 ANÁLISE QUANTITATIVA DO BENEFÍCIO AMBIENTAL GERADO PELO USO DE RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEUS EM CONCRETO	93
4.10 ANÁLISE DE CUSTOS	93
5 CONCLUSÃO.....	95
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
REFERÊNCIAS	97
APÊNDICE A – Gráficos dos ensaios do módulo de elasticidade.....	105

1 INTRODUÇÃO

A criação dos pneus foi tão relevante para o aprimoramento e intensificação da circulação de bens e pessoas, que até hoje grande parte dos sistemas de transporte utiliza-os como insumo básico. Contudo, após o término de sua vida útil, devido à massificação de sua utilização, eles impõem um importante desafio de logística reversa, constituindo um passivo ambiental de difícil disposição final, tanto por sua decomposição demorada quanto por seu grande volume.

A disposição inadequada, poluição visual das pilhas de pneus dispostas a céu aberto, riscos de insegurança hídrica associados àquelas que se formam no leito de rios, substâncias tóxicas liberadas no ar, criadouros para vetores de doenças e até incêndios de difícil controle podem se alastrar rapidamente por estes resíduos industriais.

Segundo a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos - ANIP, no ano de 2016 foram produzidos 67.870,35 novos pneus no Brasil, e em torno de 35 milhões foram descartados. No primeiro quadrimestre de 2017, foi registrada uma alta no índice de produção, em torno de 1,8%, impulsionada principalmente por pneus agrícolas (33,6%) e caminhonetes (12,2%).

A Resolução nº 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (2009), determinou que os fabricantes são os responsáveis por dar um destino final ao montante descartado. Para cada novo pneu introduzido ao mercado, deve ser dada uma destinação adequada a um inservível. De acordo com a Revista Pesquisa FAPESPE (2016), desde que esta lei entrou em vigor já foram criados mais de 1.008 pontos de coleta, sendo que no ano de 2014, cerca de 90 milhões de pneus foram coletados para terem uma destinação ecologicamente adequada.

Todo pneu em algum momento se transformará em um resíduo potencialmente danoso à saúde pública e ao meio ambiente. Uma solução para sua destinação final deverá ser adotada a fim de lidar com os riscos apresentados por este produto ao fim de sua vida útil (BERTOLLO *et al.*, 2000).

Uma das formas de reaproveitamento deste material é a reciclagem. Segundo Oliveira e Castro (2007), existem dezenas de formas de reciclagem de pneus. Os processos que não alteram as propriedades químicas do material são denominados reciclagens mecânicas, como é o caso da reforma e da recuperação. Já os processos que alteram as composições químicas do pneu são chamados de reciclagem química ou industrial.

A recauchutagem de pneus contribui para reduzir o volume desse passivo ambiental. No entanto, as bandas de rodagem substituídas vêm a constituir resíduo que demanda seu próprio descarte adequado. Uma das possibilidades que vêm sendo estudadas para o reaproveitamento deste material é o seu emprego em misturas cimentícias.

O concreto é um material amplamente utilizado na construção civil, resultante da mistura, em quantidades racionais, de aglomerante (cimento), agregados (pedra e areia) e água. Logo após a mistura, o concreto deve possuir plasticidade suficiente para as operações de manuseio, transporte e lançamento em fôrmas, adquirindo coesão e resistência com o passar do tempo, devido a reações entre o aglomerante e a água.

No intuito de melhorar algumas propriedades desse composto bem como reduzir o passivo ambiental causado pela deposição inadequada de pneumáticos na natureza, pesquisadores vêm desenvolvendo estudos sobre a viabilidade da inserção de resíduos de recauchutagem de pneus na fabricação de concreto (ALTOÉ, 2017; SOUSA *et al.*, 2017; BLESSEN & RAMESH, 2016; SOUSA, 2016; GRANZOTTO, 2010; ALBUQUERQUE, 2009; FIORITI *et al.*, 2007; SANTOS, 2005). Até então, a maioria dos estudos estavam voltados à incorporação da borracha ao asfalto para fabricação de asfalto borracha. No entanto, pesquisas recentes têm indicado o potencial do uso deste produto como agregado do concreto, um dos materiais mais consumidos no mundo, com importância primária na indústria de construção civil.

A incorporação de resíduos de borracha ao concreto propicia algumas modificações nas suas propriedades. Apesar de diminuir sua resistência mecânica, pode aumentar sua capacidade de deformação. As fibras de borracha atuam como obstáculos para a propagação de fissuras, propriedade importante, pois a ruptura de corpos de concreto se dá mediante o surgimento de trincas que comprometem a sua capacidade de suportar esforços. Segundo Fioriti *et al.*, (2007), o concreto com adição de borracha é capaz de resistir a tensões mesmo depois de sua ruptura.

A utilização de resíduos de pneus em obras da construção civil contribui para dar uma destinação nobre a um elemento altamente poluente ao meio ambiente e poderá proporcionar uma sensível redução de custos no processo de produção do concreto, considerando a substituição de alguns agregados naturais de uso tradicional para produção deste composto. Não se pode ignorar, contudo, que um dos aspectos de grande relevância na utilização deste material é o ecológico.

Tendo em vista a relevância do assunto abordado e a necessidade de se realizar pesquisas mais avançadas para dar solução a problemática dos pneus inservíveis, formulou-se a seguinte pergunta: **como o emprego de resíduo de borracha de pneu de recauchutagem como agregado na matriz cimentícia pode beneficiar as aplicações de concreto?**

1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo o Departamento Nacional de Trânsito - DENATRAN (2017), a frota de automóveis brasileira é composta por mais de 52 milhões de veículos. Se fosse estimado que ao menos 30% desses carros trocam os pneus anualmente, seriam mais de 60.000.000 de pneus descartados ou sem tratamento adequado todos os anos.

O reaproveitamento de pneus inservíveis se constitui em todo o mundo em um desafio, dadas as suas peculiaridades de durabilidade (em torno de 600 anos), quantidade, volume e peso, e dificuldade em dar um destino ecologicamente correto e economicamente viável (MORILHA JR.; GRECA, 2003).

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.

Devido à grande preocupação em dar uma destinação final adequada a este resíduo, estudos têm sido realizados com o intuito de verificar o potencial do reaproveitamento deste material para a fabricação de um novo compósito. Entre as várias formas que têm sido estudadas, uma que tem demonstrado bons resultados é a produção de concreto com resíduo de borracha. No entanto, as pesquisas sobre esse tema ainda são incipientes no Brasil. Desta forma, o presente trabalho torna-se justificável, pois busca por meio de uma pesquisa qualitativa e quantitativa avaliar a eficácia do uso dos resíduos de borracha de pneus de recauchutagem na produção de concreto para ser aplicado em elementos e componentes pré-fabricados para uso na construção civil.

Tendo em vista a possibilidade de reaproveitar os resíduos de borracha de pneus de recauchutagem para incorporá-los ao concreto, a fim de melhorar algumas de suas propriedades, e principalmente dar uma destinação ambientalmente adequada a este produto, buscou-se avaliar as características deste novo compósito.

Com base na revisão da literatura, foi verificado que este novo material, apesar de ter uma redução em suas propriedades de resistência mecânica, pode ter atributos como: maior leveza, devido à baixa densidade da borracha, maior isolamento acústico e térmico, melhor resistência à tenacidade a fratura e possível redução de custo do produto final, dado o incremento do volume proporcionado pela borracha. Essas são qualidades interessantes nas diversas aplicações do concreto.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica e econômica de um concreto produzido com inserção de resíduo de borracha de recauchutagem de pneus para elementos e componentes pré-fabricados para uso na construção civil.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Analisar o comportamento mecânico do compósito através do ensaio de compressão axial, de acordo com o ensaio normatizado pela NBR 5739 (ABNT, 2007);
- b) Avaliar a resistência mecânica à tração por compressão diametral do concreto com resíduo de borracha, com base no ensaio normatizado pela NBR 7222 (ABNT, 2011);
- c) Aferir a resistência mecânica à tração na flexão do compósito, de acordo com as especificações da Norma ASTM C293/2016;
- d) Verificar o módulo de elasticidade do concreto com borracha, segundo o ensaio normatizado pela NBR 8522 (ABNT, 2017);
- e) Caracterizar o valor da massa específica e de absorção de água por imersão, conforme o estabelecido no ensaio normatizado pela NBR 9778 (ABNT, 2009);
- f) Comparar as propriedades físicas e mecânicas do concreto sem resíduo e com resíduo de recauchutagem de pneus;

- g) Estudar a morfologia da superfície de fratura do concreto modificado;
- h) Avaliar quantitativamente o benefício ambiental gerado pela utilização do resíduo de pneus;
- i) Analisar previamente o custo para produção do compósito.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 HISTÓRICO DO PNEU

O pneu é considerado uma grande invenção tanto por sua influência sobre a movimentação de bens econômicos quanto pessoas. Foram muitas etapas de adequação até que em 1839 o norte americano Charles Goodyear, em uma de suas séries de experimentos, descobriu acidentalmente que a borracha submetida a altas temperaturas juntamente com enxofre, conseguiria manter as condições de elasticidade e resistência mesmo diante de variações de temperatura. Este processo foi chamado de vulcanização – nome dado por William Brockendon, em referência ao deus romano Vulcano – (PNEWS, 2013).

A descoberta da vulcanização se deu após um série de tentativas com outras substâncias e foi fundamental para o desenvolvimento do pneu. Anteriormente, a borracha não tinha consistência adequada, derretendo quando submetida a calor, ou ficando rígida e quebradiça a baixas temperaturas. Os veículos eram impulsionados por rodas revestidas de ferro ou madeira.

O passo seguinte foi dado por Robert Thompson em 1845, quando criou o pneumático. 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. Tratava-se do precursor da câmara de ar dos futuros pneus (PNEWS, 2013).

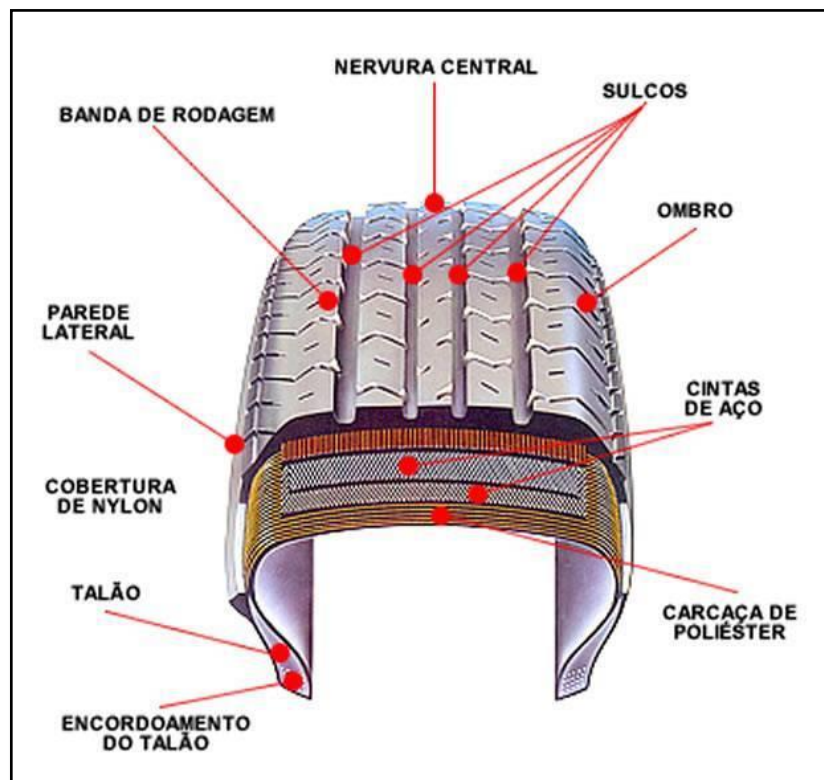
O personagem crucial nessa história, o veterinário escocês John Boyd Dunlop, deu o passo definitivo 40 anos mais tarde. Tudo começou com uma brincadeira de criança. Em 1888, observando seu filho andar com dificuldade no triciclo, cujas rodas eram de borracha vulcanizada, mas sem durabilidade, Dunlop teve uma ideia. Para resolver o problema, ele substituiu cada roda por uma câmara inflada de ar de borracha flexível, coberta com uma lona, envolvendo um aro de madeira. Assim nasceu o pneu com câmara, que inicialmente equipava bicicletas, e também era criada a primeira fabricante de pneus da história (PNEWS, 2013).

A partir daí, iniciava-se uma nova era com a criação da indústria de pneus, pois sucessivamente foram fundadas algumas das gigantes do setor até hoje: 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 CONSTITUIÇÃO E COMPOSIÇÃO DO PNEU

O pneu é um dos componentes mais importantes de um veículo automotor. Tecnicamente conhecido como pneumático, consiste de 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. É 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). Segundo informações do site da empresa Brazil Tires (2017), o pneu é constituído pelas partes descritas a seguir, que estão ilustradas na Figura 1.

Figura 1. Constituição do pneu.



Fonte: Disponível em <<http://blog.tribunadonorte.com.br/autosemotores/2016/06/10/voce-conhece-as-partes-do-pneu-do-seu-carro/>>. Acessado em: 25/01/2018.

- **Carça:** é a parte resistente do pneu construída para receber pressão, carga e impacto. Retém o ar sobre pressão para suportar o peso e a carga do veículo. Pode ser fabricada de poliéster, nylon ou aço. O processo de construção da carça é responsável por aspectos importantes de dirigibilidade, como balanceamento, geometria e simetria.

- **Talões:** são construídos conforme especificações do diâmetro, de modo a garantir 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.
- **Paredes laterais:** são as laterais (costado) dos pneus desenvolvidas por compostos de borrachas com alto grau de flexibilidade e alta resistência à fadiga.
- **Cintas (lonas):** são feixes de cintas colados sobrepostos, de maneira a suportar as cargas em movimento. Sua principal finalidade é garantir maior área de contato e menor pressão sobre o solo.
- **Banda de rodagem:** é a banda de rodagem que está em contato com o solo e que transmite a força do motor em tração. Possui blocos (as partes cheias) e sulcos (partes vazias). Deve oferecer tração, estabilidade, aderência e segurança para cada tipo de terreno.
- **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.

Existe ainda a classificação dos pneus em “com câmara” e “sem câmara”. Os sem câmara apresentam na parte interna da carcaça uma camada adicional de uma borracha especial. Os pneus sem câmara são considerados mais vantajosos por serem mais fáceis de desmontar e montar e por eliminarem o ar mais lentamente quando perfurados. Quanto à composição do pneu (matéria prima), Oliveira e Castro (2007) afirmam que a borracha é o principal material empregado, representando cerca de 40% do seu peso, sendo dividida em dois tipos:

- **Natural:** proveniente do látex, polímero extraído da seringueira – *Hevea brasiliensis*. A borracha natural possui muitos benefícios. Proporciona baixa geração de calor, alta resistência a rupturas, boa resistência à abrasão e tem características elásticas na construção do pneu. A produção de pneus representa um terço do consumo mundial dessa borracha.
- **Sintética:** tipo de elastômeros, polímeros com propriedades físicas parecidas com a da borracha natural. É derivada do petróleo ou do gás natural. Seu consumo para a fabricação de pneus representa 2/3 do total de borracha sintética no mundo.

Além da borracha, o pneu ainda é composto pelo negro de carbono ou negro de fumo, fibras orgânicas - nylon e poliéster, arames de aço, derivados do petróleo e outros produtos químicos.

O negro de fumo é responsável por deixar a borracha mais resistente e aumentar seu desempenho. Através 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).

A Tabela 1 mostra a composição química média de um pneu, e a Tabela 2 a comparação dos materiais contidos nos pneus.

Tabela 1. Composição química média de um pneu

Elemento / Composto	%
C	70
H	7
ZnO	1,2
S	1,3
Fe	15
Outros	5,5

Fonte: Andrietta (2002).

Tabela 2. Comparação dos materiais contidos em pneus

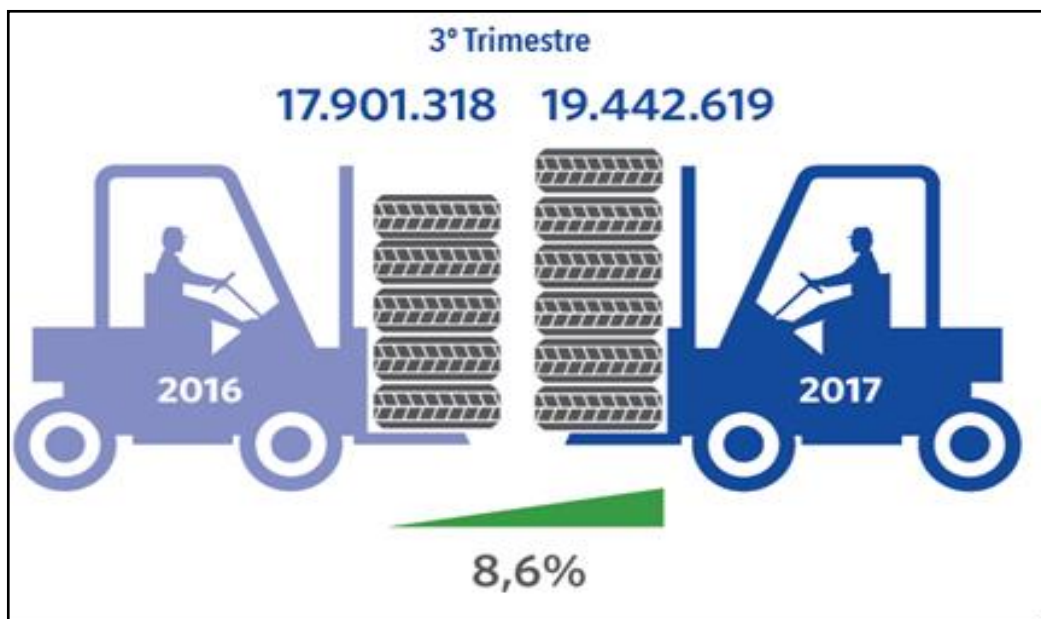
Material	Automóvel %	Caminhão %
Borracha / Elastômeros	48	45
Negro de fumo	22	22
Aço	15	25
Tecido de nylon	5	-
Óxido de Zinco	1	2
Enxofre	1	1
Aditivos	8	5

Fonte: Andrietta (2002).

2.3 PRODUÇÃO E DESTINAÇÃO DOS PNEUS NO BRASIL

Segundo dados da ANIP (2017), o terceiro trimestre de 2017 registrou um aumento de 8,6% nas vendas de pneus. O índice foi puxado principalmente pelos pneus de passeio, que cresceram 10,3%, seguidos por ônibus e caminhões (9,7%) e comerciais leves (8,5%). Na Figura 2 pode ser observado o comparativo de crescimento de vendas desses produtos em relação ao ano de 2016.

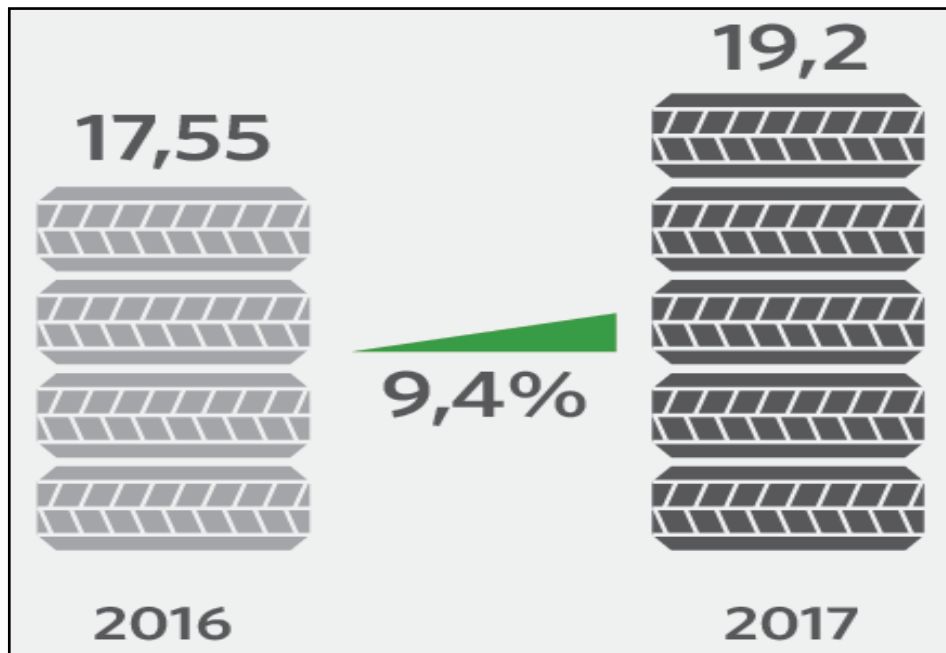
Figura 2. Total de vendas de pneus 3º trimestre (milhões de unidades)



Fonte: ANIP (2017)

A produção de pneus no terceiro trimestre de 2017 apresentou um crescimento de 9,4%, conforme ilustrado na Figura 3. Os aumentos mais significativos foram verificados nos pneus de passeio (12,4%) e de comerciais leves (14,5%). No entanto, os pneus de carga e para veículos duas rodas não tiveram um crescimento tão acentuado (3,6% e 0,3% respectivamente) (ANIP, 2017).

Em 2016, os fabricantes e importadores de pneus novos comercializaram no mercado nacional 53.411.924 unidades de pneus, o equivalente, em peso, a 729.214,03 toneladas (RELATÓRIO PNEUMÁTICOS, 2017).

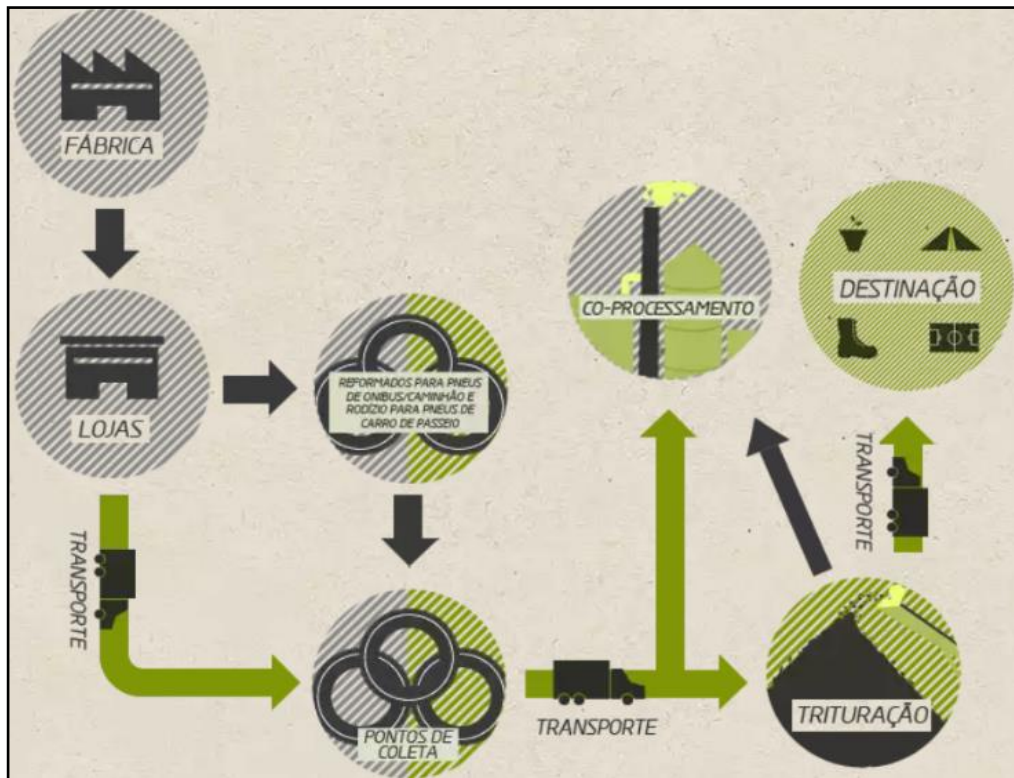
Figura 3. Produção de pneus (milhões de unidades)

Fonte: ANIP (2017)

A Resolução nº 416 do CONAMA, de 30 de Setembro de 2009, que dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, determina em seu artigo I que os fabricantes e os importadores de pneus novos com peso unitário superior a 2,0 kg ficam obrigados a coletar e dar destinação adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional. Prevê também que, os distribuidores, os revendedores, os destinadores, os consumidores finais e o poder público deverão, em articulação com os fabricantes e importadores, implementar os procedimentos para coleta destes materiais. O ciclo completo da produção até a destinação ambientalmente adequada dos pneumáticos está descrito na Figura 4.

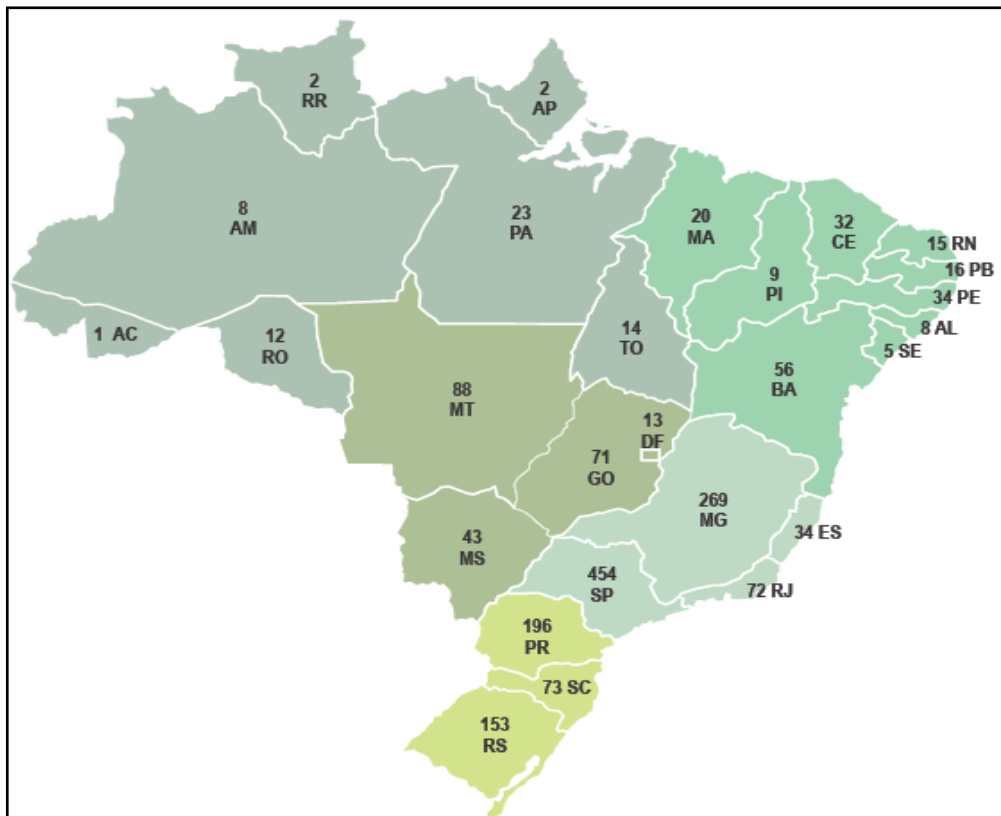
Os pneus inservíveis podem ser deixados em lugares apropriados como, por exemplo, estabelecimentos comerciais de revenda ou pontos de coleta, que são locais definidos pelos fabricantes e importadores de pneus para receber e armazenar provisoriamente os pneumáticos. O Mapa da Figura 5 demonstra a quantidade de pontos de coletas em cada estado. Em 2016, foram cadastrados 1.723 pontos de coleta, sendo 932 localizados em municípios com população residente acima de 100 mil habitantes, restando 13 municípios com essa característica, sem nenhum ponto de coleta declarado (RELATÓRIO PNEUMÁTICOS, 2017).

Figura 4. Ciclo de vida dos pneumáticos.



Fonte: ANIP (2017)

Figura 5. Pontos de coleta de pneus inservíveis declarados por estado (2016)



Fonte: Relatório Pneumáticos (2017).

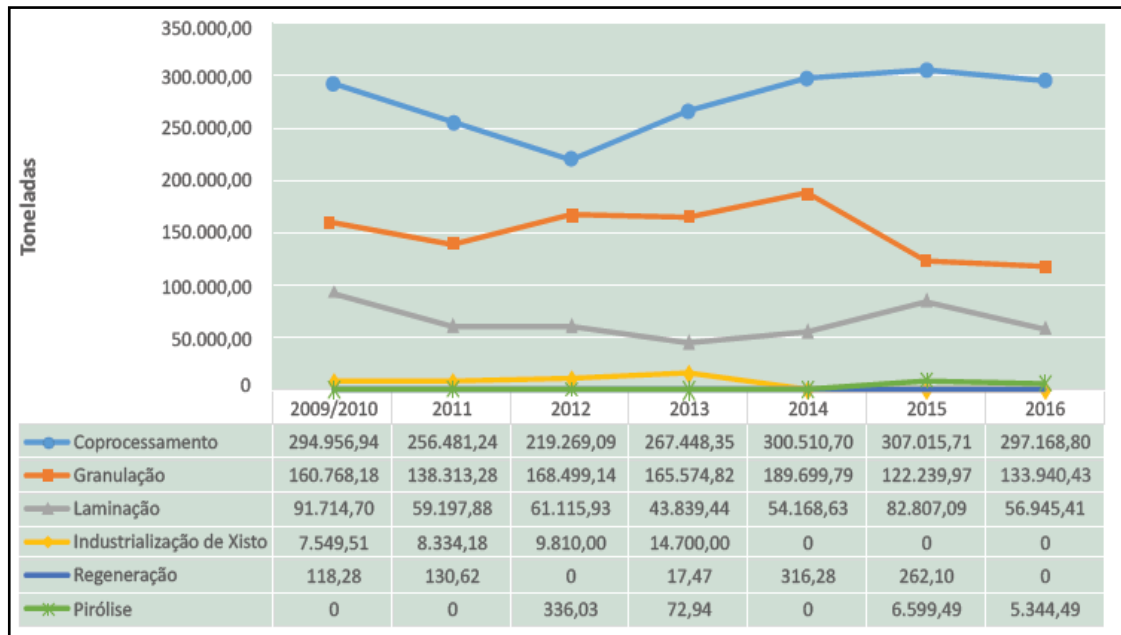
No processo de coleta, a Reciclanip (entidade criada pelas fabricantes de pneus Bridgestone, Goodyear, Michelin, Pirelli, Continental e Dunlop) é a responsável pelo transporte dos pneus a partir destes locais até as empresas de trituração, quando necessário, de onde serão encaminhados para destinação final. Os 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 resultados positivos a cada mês.

As tecnologias de destinação ambientalmente adequadas praticadas pelas empresas destinadoras e declaradas no Relatório de Pneumáticos em 2016 estão apresentadas a seguir:

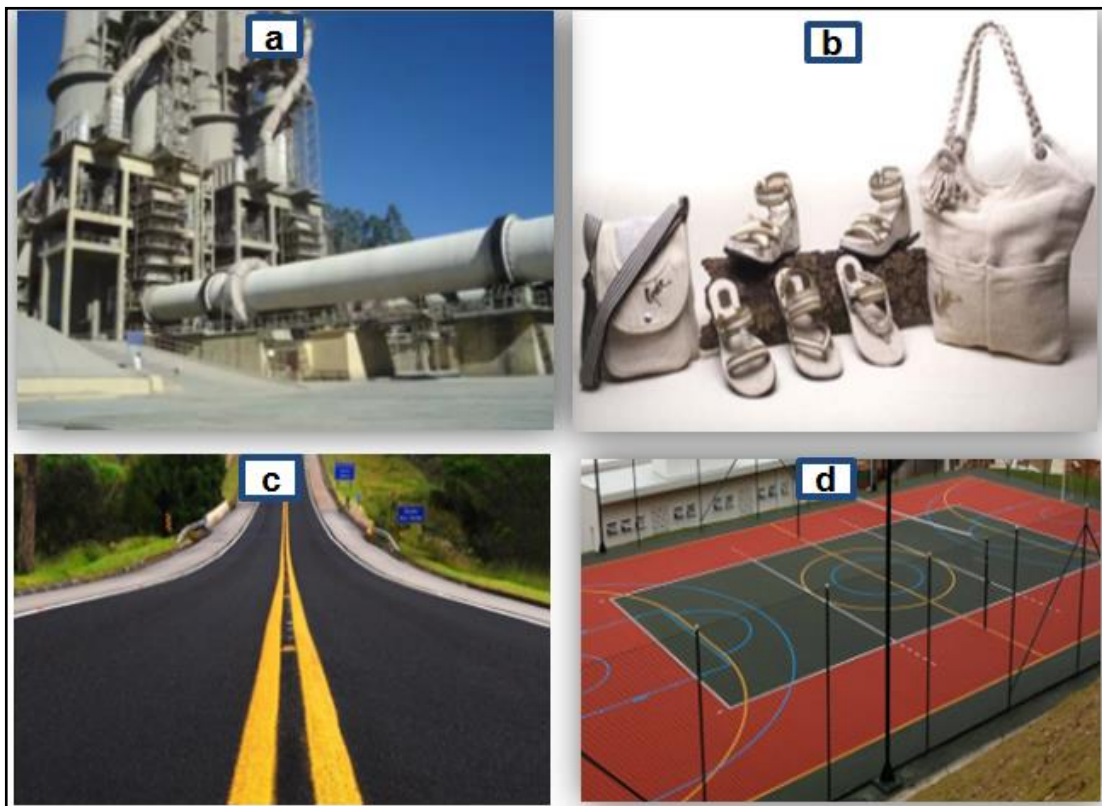
- **Coprocessoamento:** utilização dos pneus inservíveis em fornos de clínquer como substituto parcial de combustíveis e fonte de elementos metálicos;
- **Laminação:** processo de fabricação de artefatos de borracha;
- **Granulação:** fabricação de borracha moída, em diferente granulometria, com separação 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.

No Gráfico 1, está disposta a representatividade das principais tecnologias de destinação. Para a aplicação dessas tecnologias descritas, muitas vezes é necessária à transformação do pneu inservível em lascas ou *chips*, por meio da trituração. As empresas trituradoras coletam ou recebem pneus inteiros, radiais e convencionais, bem como os resíduos de borracha provenientes do processo de laminação.

No Brasil, uma das formas mais comuns de reaproveitamento dos resíduos de pneus é como combustível alternativo para as indústrias de cimento (Figura 6, a). Outras possíveis formas de reutilização referem-se ao uso para produção de solados de sapatos (Figura 6, b), borrachas de vedação, dutos pluviais, pisos para quadras poliesportivas (Figura 6, d), pisos industriais, além de tapetes para automóveis. Mais recentemente, surgiram estudos que indicam a viabilidade da inserção destes resíduos para fabricação de manta asfáltica e asfalto borracha (Figura 6, c), processo que tem sido acompanhado e aprovado pela indústria de pneumáticos (ANIP, 2017).

Gráfico 1. Tecnologias utilizadas na destinação de pneus inservíveis (Toneladas).

Fonte: Relatório Pneumáticos (2017).

Figura 6. Produtos fabricados a partir da reutilização dos resíduos de pneus.

Fonte: ANIP (2017)

2.3.1 Impacto ambiental causado pela deposição inadequada dos pneus

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. Ao término de sua vida útil, tornam-se estruturas difíceis de serem eliminadas, por serem materiais não biodegradáveis de decomposição muito lenta, em torno de 600 anos, além da dificuldade de serem armazenados em função de seu grande volume. Atualmente os aterros sanitários não os recebem inteiros e, por isso, eles acabam sendo abandonados clandestinamente em vias urbanas.

Apesar de o pneu ser um material inerte, que não contém 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. 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; 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. Além disso, há o favorecimento da entrada de água das chuvas, o que produz uma quantidade maior de chorume. Quando na superfície, tornam-se vetores de proliferação de insetos transmissores de doença tropicais – com destaque ao *Aedes aegypti*, transmissor da dengue e ambiente propício para proliferação de roedores que, entre inúmeras doenças, transmitem a leptospirose (PARRA; NASCIMENTO E FERREIRA, 2011).

Quando este material é disposto em terrenos a céu aberto, dois problemas surgem: de saúde pública, já que o acúmulo de água da chuva pode servir de criadouros para micro e macro vetores, e ambiental, pois para cada pneu queimado são liberados 10 litros de óleo, que podem percolar e contaminar o solo e o lençol freático, além de gases como carbono, dioxinas, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e outras substâncias também tóxicas e cancerígenas (RODRIGUES JORGE *et al.*, 2004).

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. Quando são empilhados e descobertos a céu aberto favorecem os riscos de incêndio (CEMPRE, 2010). A Figura 7 ilustra alguns

desses riscos: a Figura 7 (a) mostra o descarte irregular de pneus em oceanos; na Figura 7 (b) é observada a queima, com liberação de fumaça tóxica ao meio ambiente; na Figura 7 (c), observamos a deposição de pneumáticos a céu aberto, e a Figura 7 (d) representa os pneus causando obstrução de vias pluviais.

Figura 7. Passivo ambiental



Fonte: Disponível em: <<http://www.recicloteca.org.br/Default.asp>>. Acessado em: 20/12/2017.

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

2.4 LOGÍSTICA REVERSA DOS PNEUMÁTICOS

A logística reversa atua por meio da política de deposição dos materiais e produtos no seu pós-uso, para não serem descartados de forma indesejável e desordenada na natureza (LACERDA, 2002). Objetiva a redução de resíduos na fonte, a reciclagem, a substituição, a reutilização de materiais, reforma e remanufatura, sempre com a visão da cadeia, ou seja, na gestão dos fluxos reversos, desde o ponto de consumo até o ponto de origem.

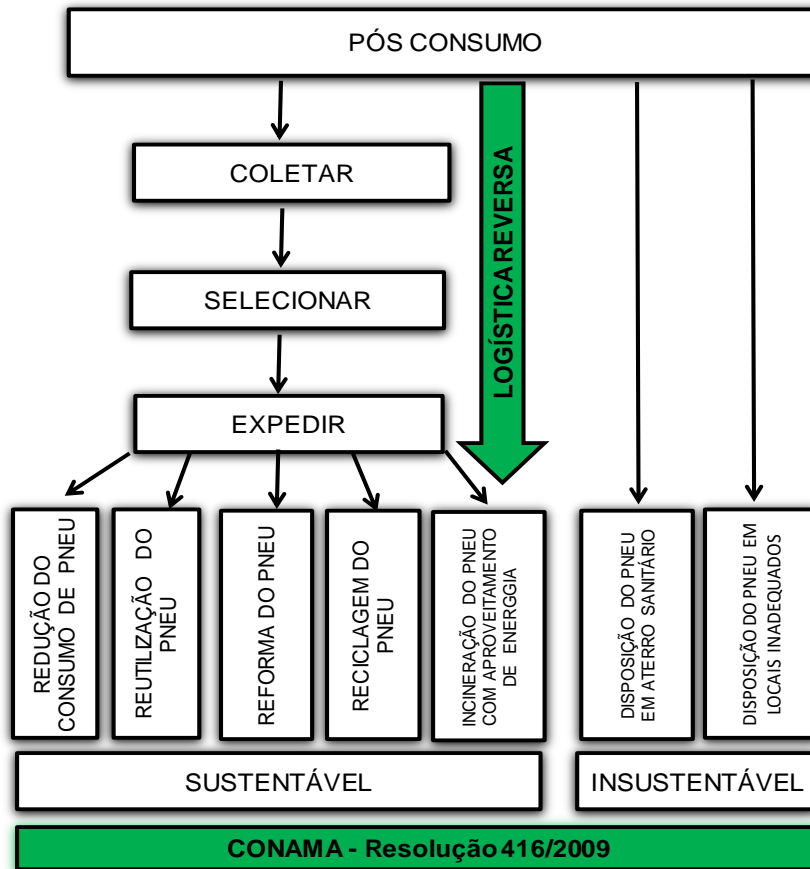
Segundo Santos *et al.*,(2010), a logística reversa tem papel importante na aplicação das avaliações do ciclo de vida dos produtos através da diminuição da geração de resíduos sólidos e de seu adequado gerenciamento, auxiliando os processos de obtenção dos insumos e do equacionamento para os produtos pós-consumo.

A indústria de pneumáticos é responsável pela destinação dos pneus inservíveis pós-consumo e pela prevenção à degradação ambiental causada por este produto. Segundo dados do Ministério do Meio Ambiente (2017), o Brasil é responsável pelo destino de mais de 40 milhões de pneus usados por ano.

Uma das principais razões que levam as empresas a utilizar a logística reversa é a legislação ambiental, que força as empresas a retornarem seus produtos à origem e a cuidarem do tratamento necessário (REVLOG, 2007). Para a indústria de pneumáticos, a Resolução 416/09 (CONAMA) é quem dispõe as regras para a coleta e destinação dos pneus inservíveis.

O processo de logística reversa gera materiais reaproveitáveis que retornam ao processo tradicional de suprimento, produção e distribuição. A logística reversa dos pneus, sob a visão dos diversos níveis de gerenciamento dos resíduos sólidos e com vistas à sustentabilidade, pode ser analisada pela: reutilização, reforma, reciclagem e incineração com aproveitamento de energia, conforme ilustrado na Figura 8 (GOTO e SOUZA, 2008).Essa prática contribui significativamente para minimizar o impacto ambiental gerado pelo fim da vida útil dos pneus.

Figura 8. Gerenciamento de resíduos sólidos e logística reserva do pneu



Fonte: Adaptado de Goto e Souza (2008).

2.5 PROCESSOS DE REFORMA DO PNEU

O pneu reutilizado tem a mesma finalidade para a qual foi projetado. Ele passa por uma reforma em que sua carcaça é reutilizada, aumentando sua vida útil. Conforme o inciso IV do Art. 1º a CONAMA Nº 416/2009 os processos de reutilização são: recapagem, remoldagem, recauchutagem.

As técnicas de reforma representam uma série de vantagens comparadas à produção de pneumáticos novos. A recapagem e recauchutagem utilizam apenas 25% do material necessário para fabricação de um pneu novo e garantem bom desempenho com custo 70% menor. A mesma carcaça pode ter até 3 vidas, com a economia de 57 litros de petróleo por pneu reformado. Algumas vantagens da remoldagem são: resistência ao movimento 3% maior que pneus novos, utilizam 25 vezes menos água, custo de 30 a 50% menor, economia de 20 a 40 litros de petróleo e consumo de energia 2,3 vezes menor (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008).

2.5.1 Recapagem

A recapagem é um processo cujo único reconstituído é a banda de rodagem, conforme ilustrado na Figura 9. Baseia-se na reconstrução do pneu, utilizando-se 1/5 da matéria-prima que seria necessária para a constituição de um novo pneu (CONAMA Nº 416/2009). É muito utilizada na reforma de pneus de caminhões e de ônibus, podendo ser realizada, em média, seis vezes por pneu.

Figura 9. Processo de recapagem.



Fonte: Disponível em: <<https://www.pneusfacil.com.br>>. Acessado em: 30/12/2017.

2.5.2 Remoldagem

O processo de remoldagem consiste em remover a borracha das carcaças, de talão a talão. Em seguida, o pneu é totalmente reconstruído e vulcanizado sem qualquer emenda (Figura 10), proporcionando perfeito balanceamento, apresentação e segurança no uso. Entretanto, os fabricantes de pneus novos alegam que, embora a borracha da cobertura seja nova, é difícil saber com precisão se a do pneu usado na remoldagem sofreu algum tipo de impacto que possa ter afetado sua estrutura (RIBEIRO, 2005).

Figura 10. Processo de remoldagem.



Fonte: Disponível em: <<https://www.pneusfacil.com.br>>. Acessado em: 30/12/2017.

A semelhança entre pneus recauchutados e remoldados, é apenas a carcaça que é herdada de pneus usados, pois os processos para confecção dos dois produtos são diferenciados (SOUZA, 2009).

2.5.3 Recauchutagem

A recauchutagem, conforme Araújo e Silva (2005), trata-se da reforma do pneu, através da substituição de sua banda de rodagem e dos seus ombros, conforme ilustrado na Figura 11. Neste processo, a banda de rodagem sofre uma raspagem manual ou mecanizada com a utilização de cilindros automatizados. O produto decorrente desta etapa é um resíduo de borracha com dimensões heterogêneas. Segundo Santos (2005) o material fino gerado, a primeira vista, parece ser pulverulento, porém, uma análise tátil visual prova tratar-se de fibras.

Para que o processo de recauchutagem tenha êxito é necessário, que a estrutura geral do pneu não apresente cortes ou deformações e a banda de rodagem deve apresentar os sulcos e saliências que permitem a aderência dos pneus ao solo (RESENDE, 2004).

Conforme Recicloteca (2009), um pneu recauchutado, pode prolongar a vida útil dos pneus em até 40% e economiza 80% dos recursos utilizados para confecção de um pneu novo, ou seja, a recauchutagem economiza energia e matéria-prima que seriam utilizados para a confecção de pneus novos.

Figura 11. Processo de recauchutagem.

Fonte: Disponível em: <<https://www.pneusfacil.com.br>>. Acessado em: 30/12/2017.

Segundo a Associação Brasileira do Seguimento de Reforma de Pneus - ABR (2017), a quantidade média de resíduo de borracha de pneu gerada no processo de recauchutagem está descrita na Tabela 3, de acordo com o tipo de veículo.

Tabela 3. Quantidade média de resíduos de borracha gerados por pneu no processo de recauchutagem.

Tipo de Pneu	Quantidade Média (Kg/pneu)
Caminhões e ônibus	1,2
Automóveis de passeio	0,4
Moto	0,2

Fonte: ABR (2017).

2.6 BORRACHA DE PNEU DE RECAUCHUTAGEM

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.

Santos (2005) verificou em seu estudo que este material possui uma forma fibrilar com relação comprimento/diâmetro médio de 8 a 10 mm, sendo classificado como fibra curta. No entanto, este resíduo possui espessuras e tamanhos variados, e sua relação de forma pode ser bastante diversificada, dentre as quais, têm-se pedaços maiores (tipo placa), alongados (tipo fibra) e granulares (tipo pó).

Este autor afirma ainda que este tipo de resíduo, por ser um material ainda novo no campo de pesquisa de aplicações em materiais compósitos, não possui procedimentos nem normas específicas para determinação de sua caracterização físico-química para o emprego como agregado de concreto. No entanto, vários autores vêm realizando estudos em que apresentam propriedades deste material, tais como granulometria, massa unitária e massa específica.

2.6.1 Composição da borracha de pneu

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).

Segundo Van Vlack (1984), os materiais poliméricos constituem-se de longas cadeias de átomos de carbono em que vários átomos ou radicais estão lateralmente ligados. Considera-se que essas macromoléculas são compostas por moléculas simples, ou meras, entidades estruturais menores que se repetem ao longo da cadeia. Este autor afirma ainda que, os polímeros que possuem a capacidade de se deformar sob determinada aplicação de força e posteriormente retornar ao seu estado original são denominados *elastômeros*. Para que o material possua essa característica é necessário que sua estrutura molecular seja formada por ligações cruzadas, que podem ser obtidas através do processo de vulcanização.

A vulcanização consiste na formação de uma rede molecular utilizando um produto químico que liga as macromoléculas entre si. Trata-se de uma reação intermolecular que aumenta a força retrativa e reduz a formação permanente residual após a remoção de forças deformantes, aumentando a elasticidade e reduzindo a plasticidade (CRIPA *et al.*, 2013).

O enxofre atua como vulcanizante somente nos elastômeros insaturados, oferecendo aos artefatos propriedades iniciais como alta tensão de ruptura, ótima resiliência, resistência à fadiga e à abrasão e aumento do módulo de elasticidade. Essas vantagens são diretamente proporcionais à densidade de ligações cruzadas, e podem ser melhoradas pela adição de uma

carga mineral conhecida como *negro de fumo*, elemento que consiste em pequenas partículas esféricas de carbono, produzidas pela combustão do gás natural ou óleo. Os pneus possuem de 15% a 30% em volume de negro de fumo e 3% a 5% de enxofre (CALISTTER Jr., 2002).

As borrachas utilizadas na fabricação de pneus são blendas poliméricas, ou seja, misturas monofásicas de elastômeros naturais (látex – homopolímero de isopreno) e sintéticos (copolímero aleatório de estireno e butadieno ou homopolímero de butadieno). No processo de reciclagem os materiais incorporados permanecem, sendo possível separar apenas as partes metálicas e fibras (ALBUQUERQUE, 2009).

2.6.2 Granulometria dos resíduos de pneus

Segundo Fioriti *et al.*, (2001), as partículas de borracha resultantes do processo de trituração podem ser classificadas, em função do seu tamanho, como: fragmentos (quando os pedaços são irregulares, variando de 50 a 30 mm); lascas (quando a trituração mecânica produz pedaços de borracha de 10 a 50 mm); grânulos (quando a borracha dos pneus é reduzida a partículas de 1 a 10 mm) e pó (partículas finas, menores que 1 mm).

A granulometria é um fator que interfere diretamente nas propriedades do compósito de matriz cimentícia, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Os autores Fattuhi e Clark (1996) concluíram que: os concretos com adição de resíduos de borracha de pneu de granulometria fina (até 5 mm) apresentaram valores de resistência à compressão menor do que àqueles adicionados de resíduos, de mesma natureza, com maiores granulometrias (até 16mm), tendo ainda ressaltado que tal observação é similar ao exposto por alguns pesquisadores e contrário à outros.

Vários pesquisadores têm analisado a influência da granulometria no desempenho do concreto com borracha. Em cada um destes estudos foram utilizados resíduos com diferentes diâmetros. Bauer e Gadret (2001) fizeram uso do pneu moído com módulo de finura de 5,63 e 7,47 para substituição do agregado miúdo e graúdo, respectivamente.

Fioriti *et al.*, (2007), realizaram uma análise granulométrica em que determinaram que o diâmetro máximo do resíduo de borracha de pneu foi de 4,75 mm e o módulo de finura 3,27.

Freitas (2007) verificou que o resíduo por ele estudado estava dentro dos limites máximos e mínimos para ser considerado como agregado miúdo, conforme o que estabelece a ABNT NBR: 7211/2009. Granzotto (2010) por outro lado, observou que o resíduo que ele utilizava em sua pesquisa ultrapassava estes limites, não podendo ser, portanto, classificado como agregado miúdo, pois o módulo de finura do material equivalia a 3,85 enquanto que, o diâmetro máximo era de 1,20 mm.

Giacobbe (2008) utilizou em seu trabalho um resíduo de borracha com módulo de finura de 4,24 e diâmetro máximo de 6,3 mm. Para Lintz e Gachet - Barbosa (2010), o módulo de finura equivale a 3,09 para resíduo com característica de pó (diâmetro máximo de 2,4 mm), e 2,32 para fibras com diâmetro máximo de 4,75mm.

2.6.3 Massa unitária e massa específica dos resíduos de borracha de pneus

A determinação da massa específica é muito importante para a dosagem do concreto. Conhecendo o seu valor é possível calcular o consumo de materiais utilizados para a produção das misturas. A definição da massa específica é a massa do material por unidade de volume (FIORITI *et al.*, 2007).

A massa unitária ou densidade aparente corresponde à relação entre a massa de uma porção de material e o volume aparente que esta porção ocupa. Neste caso, considera-se também como volume os vazios presentes entre os grãos do material.

Estas duas características físicas dos resíduos de borracha já foram estudadas por diversos autores, os resultados obtidos por eles estão demonstrados na Tabela 4. Os valores da massa unitária variam de (0,27 a 0,50) g/cm³, sendo que o valor que mais se repete é 0,39 g/cm³. Enquanto que para a massa específica os valores vão de (0,61 a 1,35) g/cm³, sendo 1,14 g/cm³, o valor mais encontrado nos estudos selecionados. Estas diferenças podem ser atribuídas aos diferentes procedimentos utilizados para determinação destas variáveis, bem como, a variação na composição química entre os pneus de passeio e de carga.

Tabela 4. Valores encontrados para massa específica e unitária na literatura pesquisada.

Autor	Valor da Massa Unitária (g/cm³)	Valor da Massa Específica (g/cm³)
Topcu (1994)	0,41	0,65
Toutanji (1995)	-	0,61
Bauer e Gadret (2001)	0,50	1,12
Nirschlet <i>et al.</i> , (2003)	0,27	1,35
Akasakiet <i>et al.</i> , (2004)	-	1,09
Meneguine e Paulon (2004)	0,40	0,55
Martins (2005)	0,32	1,15
Santos (2005)	0,30	1,14
Santos e Borja (2005)	0,41	1,26
Albuquerque (2006)	-	1,12
Fioritiet <i>et al.</i> , (2007)	0,35	1,09
Giacobbe (2008)	0,34	1,14
Campos e Jacintho (2010)	0,32	1,25
Lintz e Gachet - Barbosa (2010)	0,39	1,24
Boaventura (2011)	0,38	-
Kroth (2012)	0,37	-
Silva Jr e Martinelli (2014)	0,39	1,16
Silva Jr (2014)	0,39	1,18
Silva (2014)	0,32	1,14
Silva Jr <i>et al.</i> , (2016)	0,39	1,18
Silva <i>et al.</i> , (2017)	0,35	1,14

Fonte: Autor (2018).

2.7 CONCRETO

O concreto de cimento Portland é o material de construção mais consumido no mundo. Isso se deve, ao menos em parte, ao fato de seus componentes serem produzidos de modo relativamente fácil a partir de matérias primas locais, bem como pela versatilidade de aplicação deste compósito que se adapta facilmente às condições existentes (ROSSIGNOLO, 2009).

O concreto é um material de construção constituído por mistura de um aglomerante com um ou mais materiais inertes e água. Quando recém-misturado, deve oferecer condições tais de plasticidade que facilitem as operações de manuseio indispensáveis ao lançamento nas formas, adquirindo com o tempo, pelas reações que então se processam entre aglomerante e água, coesão e resistência (PETRUCCI, 1998).

Os materiais tradicionais constituintes do concreto são: cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água. Todavia, atualmente devido a busca por melhorias nas propriedades

desse compósito, tais como impermeabilidade, diminuição do calor de hidratação, aumento da durabilidade, maior plasticidade no estado fresco, aumento da resistência quando endurecido, etc., outros elementos como os aditivos e as adições têm sido introduzidos na mistura do concreto.

O concreto de cimento Portland é um material poroso, com uma estrutura bastante heterogênea e complexa. Segundo Mehta e Monteiro (1994) as propriedades de um material têm origem em sua microestrutura. A estrutura de um material é constituída pelo tipo, tamanho, quantidade, forma e distribuição das fases presentes. O concreto é formado basicamente por três fases distintas: pasta de cimento hidratada, agregados e zona de transição.

Para que o concreto apresente uma boa resistência mecânica, que é uma de suas propriedades mais importantes, é necessário que haja uma boa aderência entre a pasta de cimento e os agregados. A qualidade da ligação entre essas duas fases depende das características da superfície das partículas do agregado e da natureza da pasta de cimento hidratada na interface entre os dois materiais (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Coutinho (1999) afirma que a ligação entre o agregado e a pasta de cimento advém de fatores como: a rugosidade superficial do agregado; propriedades químicas do cimento e do agregado, e às propriedades eletrostáticas da superfície das partículas. Ainda segundo este autor, existem os seguintes tipos de ligação entre a pasta de cimento e os agregados:

- **Mecânica** - ligação macroscópica que ocorre devido à rugosidade superficial do agregado na qual os cristais oriundos da hidratação do cimento envolvem-se as protuberâncias;
- **Absorção** - o agregado absorve água contendo parte do cimento dissolvido, que irá se cristalizar em seu interior ao mesmo tempo em que o da pasta de cimento, fazendo com que ocorra a ligação entre as duas fases;
- **Atração** - entre a pasta de cimento e os agregados por forças de Van der Waals;
- **Aderência** - de origem química devida à reação entre os produtos de hidratação do cimento e a superfície do agregado.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), há basicamente três classificações para o concreto: concreto de baixa resistência (menor que 20 Mpa), concreto de resistência moderada (de 20 a 40 Mpa) e o concreto de alta resistência (superior a 40 Mpa). O mais utilizado nas estruturas é

o concreto de resistência moderada. Todos os três são muito resistentes em relação à compressão axial, porém, a sua resistência à tração é de apenas 10% da sua resistência à compressão.

2.8 CONCRETO COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEUS

No intuito de diminuir o passivo ambiental causado pela disposição inadequada dos pneus inservíveis, e tendo em vista as propriedades da borracha de pneu, tais como baixa densidade, absorção ao impacto, capacidade de deformação, durabilidade e impermeabilidade, diversos autores têm buscado avaliar o potencial do uso de resíduos de borracha de pneus reciclados para produção de pavimentos de concreto e elementos pré-fabricados.

O resíduo incorporado ao concreto pode dar-se por substituição parcial ou total do agregado graúdo ou miúdo, e mesmo somente pela adição deste material ao compósito. Santos (2005), afirma que quando se adiciona fibras ao concreto, pretende-se com isso provocar uma costura entre as infinitas seções que compõem o sólido, combatendo principalmente as fissuras provocadas pela retração.

Fioriti *et al.*, (2001) e Fioriti, Ino e Akasaki (2006) investigaram a incorporação de resíduos de borracha de pneus para fabricação de pavimento intertravado de concreto e apesar de terem observado uma queda nas propriedades de resistência mecânica do compósito, verificaram que a substituição parcial do agregado graúdo por resíduo traz benefícios ambientais que são interessantes do ponto de vista da sustentabilidade.

Trigo (2008) e Fazzan (2011) estudaram a inclusão do resíduo de borracha de pneu em lajes de concreto armado. Os autores mostraram que o uso do resíduo de borracha de pneu não prejudicou o comportamento estrutural dessas lajes. O resíduo melhorou algumas características do compósito, proporcionando, por exemplo, um aumento da tenacidade, uma diminuição da retração e uma distribuição mais eficaz dos esforços.

Santos (2005) desenvolveu um concreto com adição de fibras de borracha produzidas na recauchutagem do pneu, aplicando-o na confecção de placas pré-moldadas a fim de analisar o seu comportamento diante de esforços mecânicos. Os teores das adições foram de (1%, 2%, 3%). Os resultados apontaram uma diminuição da resistência à compressão do concreto, por outro lado, ocorreu um aumento da tenacidade e da resistência ao impacto. Foi estudado ainda o ponto de fulgor da borracha e observado que este ocorre em uma faixa de temperatura muito acima daquela em que o concreto tem suas propriedades ameaçadas.

Fioriti *et al.*, (2007) avaliaram, por meio de um estudo experimental, as propriedades de blocos de concretos para pavimentação intertravada produzidos com a inserção de resíduos de pneus de recauchutagem. Em sua pesquisa estes autores substituíram, de forma parcial, os agregados naturais por esses resíduos, em frações volumétricas de (8%, 10% e 12%). Os resultados demonstraram que, apesar de ter havido uma queda na resistência à compressão do compósito, propriedades como a absorção e a tenacidade à fratura foram melhoradas, demonstrando que o uso desse pavimento é indicado para locais de baixa solicitação de tráfego. Esses mesmos autores fizeram um estudo similar em (2010), utilizando desta vez teores de substituição de (8%, 10%, 12% e 15%). Os resultados foram semelhantes aos encontrados em (2007).

Lintz e Gachet - Barbosa (2010) fizeram uma avaliação das propriedades mecânicas de concretos com resíduos de borracha vulcanizada empregados na fabricação de pisos intertravados, produzindo diferentes misturas de concreto com incorporações crescentes de borracha, em substituição parcial aos agregados naturais de (2,5%, 5%, 7,5% e 10%). Os resultados demonstraram a viabilidade técnica dessa ideia com a substituição de até 2,5% da massa de agregado miúdo natural pelo agregado reciclado de borracha.

Romualdo *et al.*, (2011) reaproveitaram os resíduos de borracha inserindo-os na composição de concreto para pavimentação de calçadas, em substituição ao agregado miúdo em frações de (5%, 10% e 15%). Os resultados apontaram que o traço que se mostrou mais satisfatório para o uso em pavimentação de calçadas foi o de 5% de adição fibras de pneus. Apesar de perder em resistência, o concreto borracha ganhou em outras propriedades mecânicas, principalmente relacionadas à flexibilidade.

Queiroz (2012) estudou a incorporação do resíduo de borracha de pneu em tubos de concreto simples. Os resultados dessa pesquisa mostraram que todos os tubos apresentaram resistência superior ao limite especificado pela norma NBR 8890 (ABNT, 2007).

Brito (2013) foi outro autor que buscou avaliar as propriedades do concreto com resíduo de borracha para fabricação de blocos de concreto empregados em pavimentação intertravada. As porcentagens de substituição foram de (3,88%, 4,48% e 5,82%) do volume dos agregados. No entanto, os resultados obtidos por ele não foram satisfatórios para o uso do concreto em pavimentação, visto que não atenderam às especificações mínimas referentes a resistência mecânica estabelecida pelas normas vigentes.

Moreira, Fidelis e Dias (2014) desenvolveram um concreto com adição de borraça de pneu, em substituição do agregado miúdo em frações volumétricas de (50%, 25% e 12,5%), para a execução da pavimentação de uma ciclovia. Do ponto de vista tecnológico, verificou-se perda considerável na resistência à compressão em relação ao concreto convencional. No entanto, os valores obtidos foram compatíveis com a necessidade do serviço executado.

Tretim (2014) fez uma análise do comportamento estrutural de cinco tubos de concreto armado, sendo um deles sem adição de resíduo de borracha, dois deles com uma quantidade de resíduos igual a 10 kg de borracha por metro cúbico de concreto e outros dois com uma quantidade de resíduo de 20 kg de borracha por metro cúbico de concreto. Os tubos confeccionados tinham um diâmetro nominal de 60 cm e um comprimento efetivo de 150 cm. Como resultado este autor verificou que todos os tubos com resíduo de borracha de pneu seguiram o mesmo padrão de fissuração em relação ao tubo controle (sem adição de resíduo), porém, apresentando uma carga de fissura maior, retardando, deste modo, o início do processo de fissuração.

Vieira (2014), em sua dissertação de mestrado, buscou demonstrar a viabilidade de um compósito cerâmico contendo fibra de borracha na fabricação de blocos intertravados. Como já era de se esperar, os resultados indicaram que a adição que fibras conferiu ao concreto estudado uma diminuição na resistência à compressão em relação ao concreto tradicional. Este resultado foi atribuído à maior presença de poros e à baixa aderência entre as fibras e a matriz cimentícia.

Silva (2014) avaliou o reaproveitamento de resíduo de borracha de pneus, proveniente do processo de recauchutagem, em substituição parcial do agregado miúdo natural em porcentagens de (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) para a produção de pisos táteis intertravados de concreto. Embora a grande limitação do uso da borracha de pneus como agregado no concreto seja a redução das resistências mecânicas, os traços com até 50% de substituição atingiram ótimos valores de resistência à compressão e resistência à tração na flexão e apresentaram melhores resultados de resistência à abrasão.

Oliveira e Menegotto (2014), no intuito de contribuir com um melhor aproveitamento dos resíduos de borracha de pneus gerados no processo de recauchutagem, avaliaram a viabilidade técnica da adição deste material para a confecção de peças de concreto utilizadas na pavimentação intertravada. Os resultados da pesquisa, no entanto, constataram que nenhum dos traços de concreto analisados atingiu a resistência mínima de 35 MPa exigida pela NBR 9781 (ABNT, 2013).

Silva *et al.*, (2017) avaliaram o comportamento do concreto com adição de resíduo de borracha de pneus na produção de peças de concreto para pavimentação, onde o agregado miúdo foi substituído em massa pelo resíduo de borracha nas proporções de (2,5%; 5,0%; 7,5%; 10%; 20% e 50%). Os resultados mostraram que, para um determinado intervalo de porcentagem de substituição do agregado miúdo por resíduo de borracha, houve uma melhora na resistência à compressão dos pisos intertravados, e para até 10% de substituição é possível empregar este material na produção de pisos de concreto para tráfego pesado, segundo as recomendações da norma brasileira.

Altoé (2017) analisou a resistência mecânica e a absorção de água de corpos de prova de concreto fabricados com e sem resíduos. Foram utilizados 4 teores de substituição (2%, 5%, 7% e 10%), na tentativa de definir um comportamento para as características estudadas quando da substituição proposta. O resíduo de pneu mostrou-se um substituto viável ao agregado miúdo em teores de (2%, 5% e 7%), na fabricação de *pavers* sujeitos a solicitações leves, apesar de apresentar uma redução na resistência à compressão e um aumento na absorção de água dos traços confeccionados.

2.8.1 Propriedades do concreto com resíduo de borracha de pneus

2.8.1.1 Efeito na massa específica

Uma das propriedades do concreto que pode ser melhorada com a inserção de resíduo de pneus em substituição parcial dos agregados naturais é a sua massa específica, visto que a borracha apresenta um baixo valor para essa grandeza.

Pesquisas demonstraram que a substituição de 50% dos agregados tradicionais por resíduos de borracha proporciona uma redução de até 75% na massa específica do concreto seco. Quando se trata apenas de substituição do agregado miúdo, este percentual varia de 10 a 30% (FATTUHI e CLARK, 1996; SUKONTASUKKUL e CHAIKAEW, 2006).

Outro fator que foi observado por estudiosos neste campo de pesquisa foi a forte relação entre o teor de ar na mistura e a porcentagem em massa de agregado de borracha. Este comportamento pode ser atribuído à natureza apolar da superfície das partículas de borracha, e sua tendência a aprisionar o ar no interior de sua morfologia rugosa (RAFAT e TARUN, 2004; NAJIM e HALL, 2010).

2.8.1.2 Trabalhabilidade do compósito

A trabalhabilidade do concreto é nitidamente reduzida com a inserção de partículas ou fibras de borracha. Autores como Najim e Hall (2010) verificaram uma relação diretamente proporcional entre o percentual de resíduo inserido e a redução dessa propriedade do concreto. Este fenômeno pode ser atribuído à elevação do nível de fricção entre as partículas do agregado de borracha e os outros constituintes do concreto, bem como, à redução da densidade da mistura plástica (BATAYNEH *et al.*, 2008; TAHA *et al.*, 2008).

Yilmaz e Degirmenci (2009) relatam que com a adição de resíduo de borracha com dimensões entre 4,75 mm e 0,425 mm, em até 40% em volume do agregado miúdo é possível obter uma trabalhabilidade adequada em relação ao concreto sem adição. Zhenget *al.*, (2008) afirmam que para substituições superiores a este volume, o *Slump* é reduzido em até 45%, sendo que para a substituição de agregado graúdo e miúdo por partículas de borracha com dimensões de 4,75 mm, a redução no abatimento observada foi da ordem de 43% e 57%, respectivamente.

2.8.1.3 Resistência mecânica e ductilidade

As pesquisas relacionadas à inserção de resíduos de borracha em concreto, quase que em sua totalidade têm demonstrado que há uma relação direta entre o aumento do teor de borracha incorporado e a diminuição da resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade do concreto (ALTOÉ, 2017; ROMUALDO *et al.*, 2011; LINTZ e BARBOSA, 2010; FIORITI, *et al.*, 2007; FIORITI *et al.*, 2001).

Segundo Najim e Hall (2010), os mecanismos responsáveis pela redução nessas propriedades são a grande diferença entre o módulo de elasticidade da borracha e da pasta de cimento endurecida, e o fraco desenvolvimento da interface na zona de transição. Estes autores acreditam que estes dois fatores são interdependentes sendo que a fraca ligação na zona de transição ocasiona a propagação de microfissuras que se desenvolvem em torno das partículas de borracha, e, sob carregamento, as taxas diferenciais de tensão entre a borracha e a pasta de cimento endurecida agravam o problema.

Autores como Khatib e Bayomy (1999), Khaloo *et al.*, (2008) e Zhenget *al.*, (2008), através de seus estudos afirmam que não é recomendada a inserção de borracha em teores superiores a 20%, 25% e 30%, respectivamente, para que não haja redução drástica das propriedades mecânicas do concreto.

Pelisser e Bernadin (2011) publicaram um estudo internacional onde obtiveram bons resultados para o concreto com inserção de borracha e sílica ativa. A perda na resistência à compressão foi de apenas 14%, sendo que a resistência média final do compósito alcançou um valor de 48 Mpa, podendo ser empregado em pavimentação por estar de acordo com as normas vigentes.

Uma das poucas propriedades que podem ser melhoradas no concreto com adição de borracha é a tenacidade à fratura, pois a taxa de deformação aumenta consideravelmente com a inserção deste resíduo com dimensões entre 4,75 mm e 0,425 mm (NAJIM e HALL, 2010). No entanto, esta melhora é observada de forma contínua até o teor limite de 25% de borracha incorporada. Porcentagens além desse valor geram efeito inverso (KHALOO *et al.*, 2008).

O concreto com borracha também possui maior ductilidade do que o concreto simples, visto que as taxas de deformação mais elevadas permitem maior deformação plástica antes do ponto de ruptura (SNELSON *et al.*, 2009). Esta propriedade é melhorada principalmente quando o tamanho das partículas de borracha possui dimensão superior a 4,75mm (ZHENG *et al.*, 2008). Topçu (1997) obteve um resultado mais vantajoso quando substituiu a fração em massa de 15% do agregado miúdo e graúdo pela borracha.

2.8.1.4 Resistência ao impacto

A adição de agregados de borracha com dimensões superiores a 4,75 mm pode aumentar a resistência ao impacto substancialmente na primeira fenda como nas fases de falha. No entanto, a largura das fendas e sua propagação são maiores em comparação com o concreto utilizando agregado natural. Este comportamento é devido, provavelmente, à maior capacidade de deformação da borracha que conduz, por sua vez, a um aumento na absorção de energia (NAJIM e HALL, 2010; AL-MASHHADANI, 2001; FATTUHI e CLARK, 1996).

Além de haver um aumento na capacidade de absorção ao impacto no concreto produzido com borracha, ocorre também a melhora nas propriedades de resistência à abrasão e a cavitação. Por isso, este tipo de material tem seu uso indicado para estruturas submetidas ao impacto, pois consegue absorver grande quantidade de energia, transformando a ruptura

frágil do concreto em dúctil, tornando-se mais durável em relação ao concreto convencional (KORMANN, 2002; DUKE, 2001; TOPÇU e AVCULAR, 1997; TOPÇU, 1995).

2.8.1.5 Influência da granulometria da borracha de pneu no comportamento mecânico do concreto

A granulometria do resíduo de borracha pode interferir diretamente no desempenho final do concreto. Topçu (1995) constatou que a resistência à compressão deste compósito diminui em torno de 50% para borrachas mais finas, e 60% para as com maior diâmetro. Segre e Joeques (2000), assim como Santos (2005) e Granzotto (2010), também verificaram que quanto maior o tamanho das partículas adicionadas menores serão as resistências obtidas no concreto.

Por outro lado, Albuquerque *et al.*, (2001) observaram o oposto, concluindo que quanto maiores as partículas melhores são os resultados obtidos para as propriedades de resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral e massa específica. Estes autores atribuíram o fato à dificuldade do adensamento dos concretos contendo partículas de borrachas mais finas, as quais encontram maior facilidade de deslocamento no interior da mistura, acarretando o fenômeno da segregação.

Zhenget *al.*, (2008), Tahaet *al.*, (2008) e Topçu (1995) verificaram que as partículas de borracha com dimensões entre 4,75 mm e 0,425 mm resultam em menores perdas nas resistências mecânicas do concreto do que resíduos com dimensões superiores a esta faixa.

2.8.1.6 Tratamento do resíduo de borracha de pneu

O maior problema encontrado por pesquisadores para a incorporação de resíduos de borracha ao concreto é a fraca adesão entre estas partículas e a matriz de cimento, esta deficiência é a principal responsável por reduzir as propriedades mecânicas do compósito. Por isso, alguns estudos têm surgido com o intuito de desenvolver tratamentos que auxiliem na resolução desta questão.

Zhenget *al.*, (2008) relatam que as borrachas por serem de natureza orgânica são quimicamente pouco compatíveis com a areia e o cimento (materiais inorgânicos). A solução encontrada por ele para fortalecer a aderência entre a matriz cimentícia e as fibras de borracha no concreto, foi utilizar agentes compatibilizantes, compostos por grupos funcionais químicos

do tipo anidrido e epóxido, altamente reativos e capazes de formar ligações estáveis. Os resultados obtidos mostraram que os dois compatibilizantes foram eficientes nesse propósito.

Kroth (2012) realizou uma pesquisa em que comparou o desempenho de dois diferentes traços de concreto com borracha, um com a utilização de tratamento químico em ácido sulfúrico (H_2SO_4 -1M) e outro com solução de hidróxido de sódio (NaOH – 1M, 2M e saturada). O autor constatou que, o compósito formado pelo segundo traço com a utilização de tratamento em (NaOH) 1M, apresentou melhor aderência entre a matriz cimentícia e as partículas de borracha.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa teve caráter de estudo exploratório visto que, segundo Gil (1999), este tipo de trabalho envolve levantamento bibliográfico e procedimento experimental. Quanto à forma de abordagem do problema, é considerado como qualitativo, o qual, segundo Cervo, Bervian e da Silva (2007, p.61), “ocorre quando se registra, analisa e correlaciona fatos ou fenômenos, sem manipulá-los”, e quantitativo, tendo em vista que traduz as informações descritas em dados quantificáveis.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 Resíduo de borracha de pneus

Para confecção do concreto utilizou-se um resíduo de borracha de pneus proveniente do processo de recauchutagem de uma fábrica localizada na Região Metropolitana de Belém-RMB. Durante a etapa de raspagem da banda de rodagem dos pneus são gerados grânulos de borracha de diversas formas e tamanhos. Estes resíduos ficam no chão da fábrica e, posteriormente, são recolhidos por uma mangueira de sucção para serem armazenados em camburões e posteriormente receberem uma destinação, que na maioria das vezes, é o aterro sanitário. A Figura 12 ilustra as etapas de geração deste material.

O resíduo gerado, além da borracha, possui uma porcentagem de arames de aço. Por isso, antes de sua caracterização, foi realizada a retirada destes componentes com o auxílio de um ímã eletromagnético, após esse processo foi feito o peneiramento para separação do material em tamanhos médio, fino e grosso, conforme descrito no Fluxograma da Figura 13.

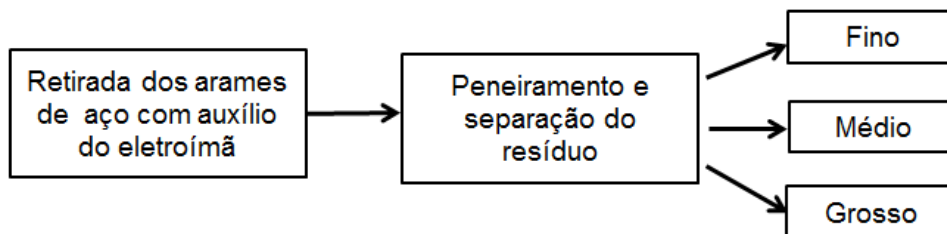
O material utilizado neste trabalho é referente aos grânulos de tamanho médio, sendo composto por formatos tipo: partículas granulares (pó) e fibras curtas com diâmetros (médio e fino), conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 12. Geração dos resíduos.



Fonte: Autor (2018)

Figura 13. Fluxograma do beneficiamento do resíduo



Fonte: Autor (2018)

Figura 14. Resíduo de borracha de pneu utilizado



Fonte: Autor (2018)

Quanto à classificação ambiental, os resíduos de recauchutagem de pneus estão enquadrados, segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004), na Classe II A – não inertes, por apresentarem teores de metais como (Zinco e Manganês) no extrato solubilizado superiores aos padrões estabelecidos pela referida norma.

Para à aferição das características físicas do resíduo, como não existem normas específicas para este tipo de material, utilizou-se as especificações presentes nas normas de caracterização de agregados do concreto. Dessa forma, realizou-se o ensaio de composição granulométrica com base na NBR NM 248 (ABNT, 2003), e massa unitária conforme estabelece a NBR NM 45 (ABNT, 2006). Para a massa específica, utilizou-se o ensaio descrito na Norma ASTM C 792 (2015), com adaptações.

3.2.2 Aglomerante hidráulico

Optou-se por utilizar o cimento CP II-F-40 da marca Poty. Este tipo de aglomerante hidráulico possui adição de 6 a 10% de fíler calcário e tem como característica principal o seu alto grau de finura que proporciona elevada resistência inicial e final, sendo indicado para o uso em concreto armado, argamassa estabilizada, concreto para pavimentos e pisos industriais. Este cimento atende ao que está estabelecido na NBR 11578 (ABNT, 1991). As Tabelas 5 e 6 apresentam, respectivamente, as propriedades químicas e físicas deste tipo de material. Os dados foram fornecidos pelo fabricante.

Tabela 5. Relatório de ensaios químicos do cimento

Data	Químicos									
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resíd. Insol.	Equiv. Alcal.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Média	4,24	18,48	2,63	61,02	4,33	2,76	4,99	0,78	1,10	0,66
Sd	0,07	0,13	0,03	0,31	0,28	0,13	0,09	0,12	0,11	0,02
Min	4,15	18,26	2,58	60,58	3,87	2,59	4,78	0,61	0,96	0,63
Max	4,38	18,70	2,69	61,48	4,67	2,97	5,13	1,01	1,33	0,68

Fonte: Catálogo Poty (2018)

Tabela 6. Relatório de ensaios físicos do cimento

Físicos										
Exp. Quente	Tempo de Pega		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
	Início	Fim					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
mm	h: min	h: min	%	cm ² /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
0,22	03:16	03:55	29,3	4.215	0,07	1,10	21,8	37,4	43,5	51,0
0,08	00:10	00:09	0,40	65,02	0,05	0,57	1,00	1,70	1,70	2,30
0,09	02:58	03:35	28,5	4.111	0,02	0,53	20,4	34,7	41,1	48,0
0,35	03:31	04:07	29,8	4.309	0,20	2,02	23,5	39,3	46,0	54,0

Fonte: Catálogo Poty (2018)

3.2.3 Agregado miúdo

Este 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).

Figura 15. Areia utilizada nesta pesquisa

Fonte: Autor (2018)

3.2.4 Agregado graúdo

Como agregado graúdo, utilizou-se seixo rolado de origem quartzosa obtido de uma seixeira, localizada no município de Capitão Poço – PA (Figura 16). 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).

Figura 16. Seixo utilizado nesta pesquisa



Fonte: Autor (2018)

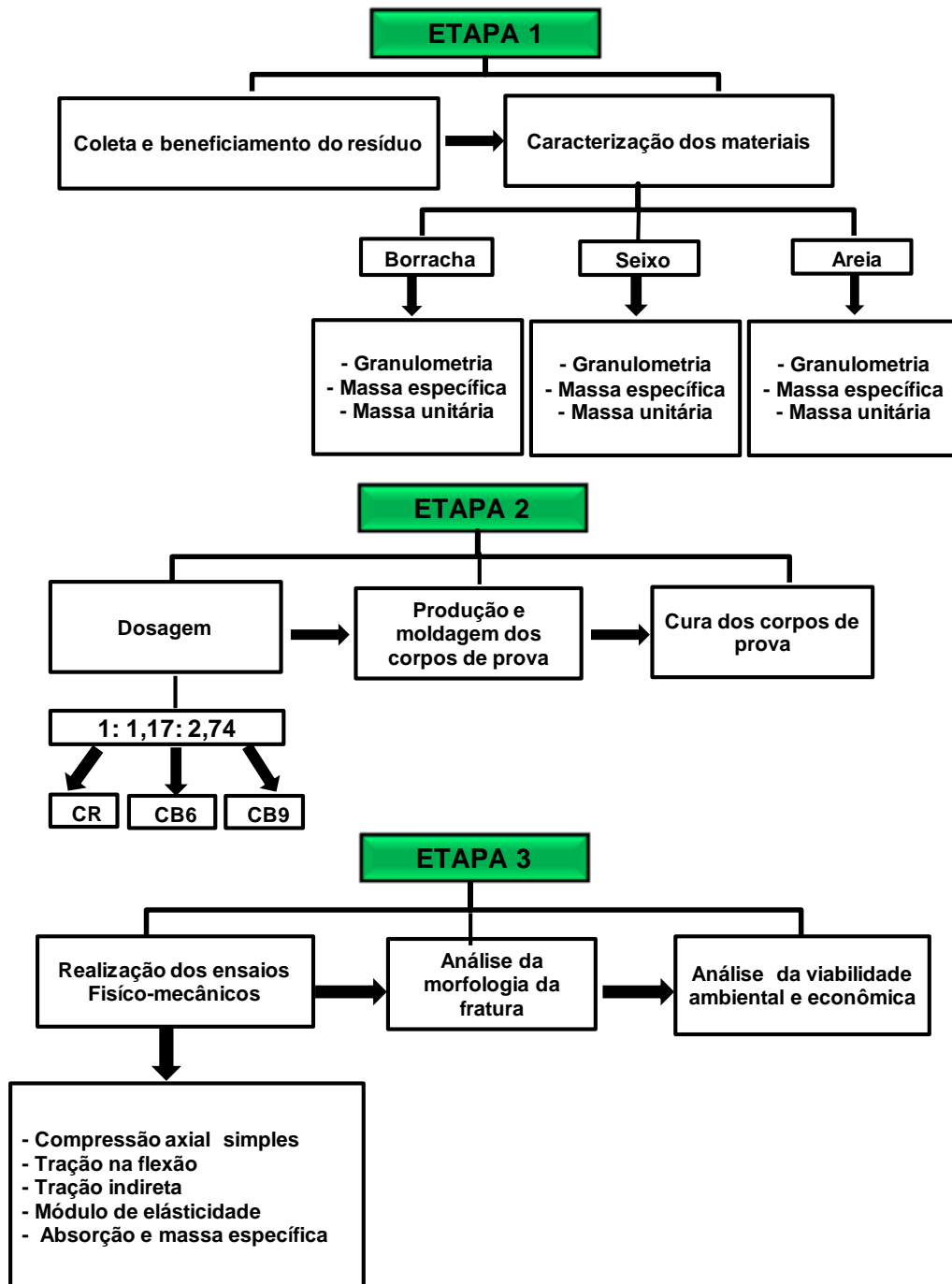
3.2.5 Água

Agente responsável pela reação de hidratação do cimento, a água é componente fundamental na produção do concreto. Utilizou-se água potável proveniente da rede de tratamento público da cidade de Belém-PA, a qual é considerada potável e própria para este uso.

3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A fase laboratorial do presente trabalho foi composta de três etapas principais, a sequência utilizada na realização dos procedimentos experimentais está descrita no fluxograma da Figura 17.

Figura 17. Fluxograma dos procedimentos experimentais



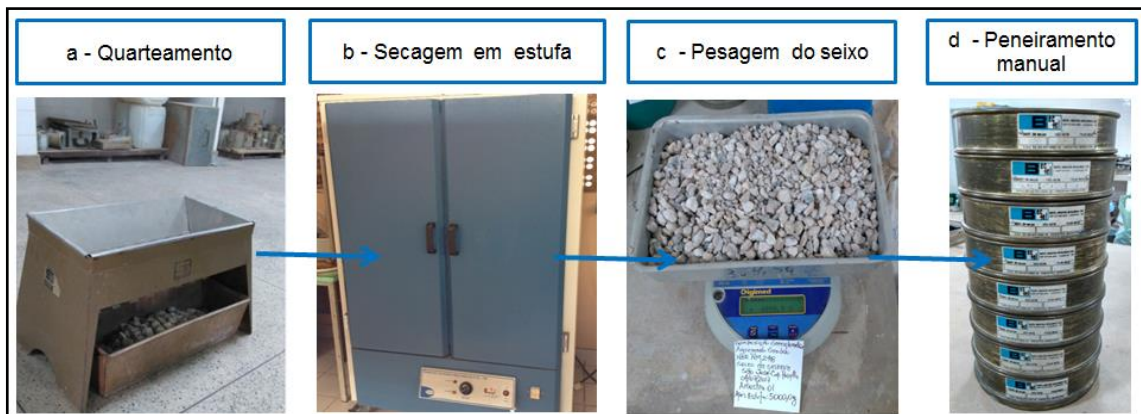
3.3.1 Caracterização dos materiais

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 fez-se a homogeneização do material e depois o quarteamo. Para o seixo utilizou-se duas amostras com (5 kg) cada uma; 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 (m_1 e m_2). 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. A Figura 18 ilustra o passo a passo do ensaio de seixo e a Figura 19 e 20 as massas retidas nas peneiras do ensaio da areia e da borracha.

Figura 18. Sequência do ensaio de granulometria



Fonte: Autor (2018)

Figura 19. Massas retidas em cada peneira do agregado miúdo



Fonte: Autor (2018)

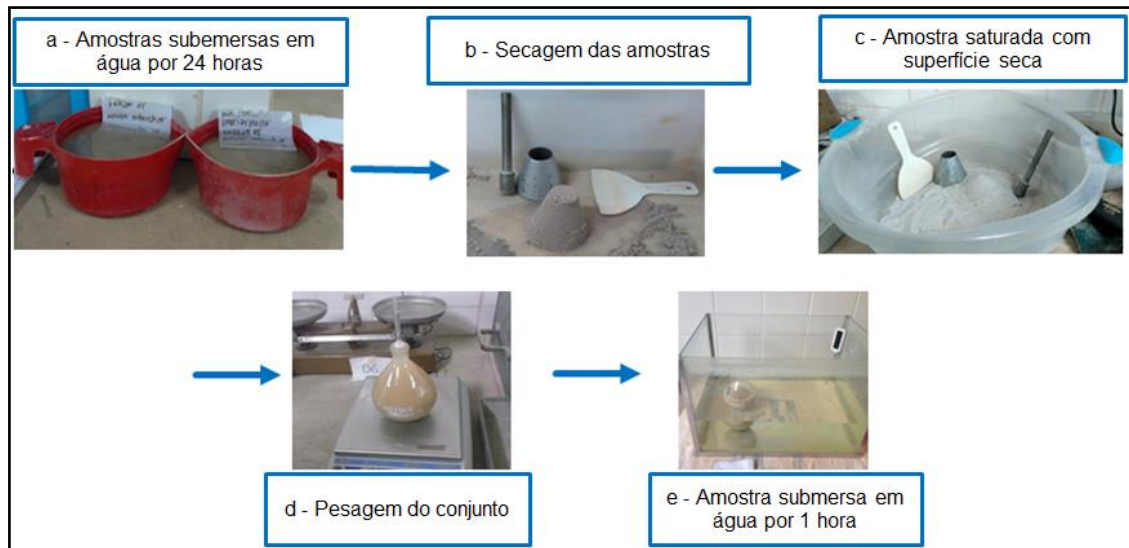
Figura 20. Massas retidas em cada peneira do resíduo de borracha



Fonte: Autor (2018)

3.3.1.2 Massa específica, massa específica aparente e absorção do agregado miúdo

Para a determinação da massa específica da areia, seguiu-se os procedimentos adotados pela NBR NM 52 (ABNT, 2009). Primeiramente, procedeu-se à homogeneização e o quarteamento para a obtenção de duas amostras de aproximadamente 1 Kg, cada uma, que foram submersas em água por um período de 24 horas. Após isso, o material foi retirado da água e seco. Quando areia já se encontrava na condição de saturada de superfície seca, 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. O processo é ilustrado na Figura 21.

Figura 21. Ensaio da massa específica da areia

Fonte: Autor (2018)

Por fim, o agregado miúdo foi retirado do frasco e colocado em uma estufa 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 Massa específica, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo

A determinação da massa específica do agregado graúdo seguiu os procedimentos descritos na NBR NM 53 (ABNT, 2009). Inicialmente, o seixo foi submerso em água por um período de 24 horas. Depois retirou-se a amostra da água e secou-a com toalhas absorventes. Determinou-se imediatamente a massa da amostra saturada de superfície seca e colocou-se a amostra em um cesto de arame, submergindo-a em água a temperatura de (23 °C). Posteriormente, pesou-se a amostra em água, utilizando uma balança hidrostática. O detalhamento do ensaio é ilustrado na Figura 22. A massa específica do seixo foi calculada de acordo com as Equações constantes na NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Figura 22. Detalhe do ensaio da massa específica do seixo

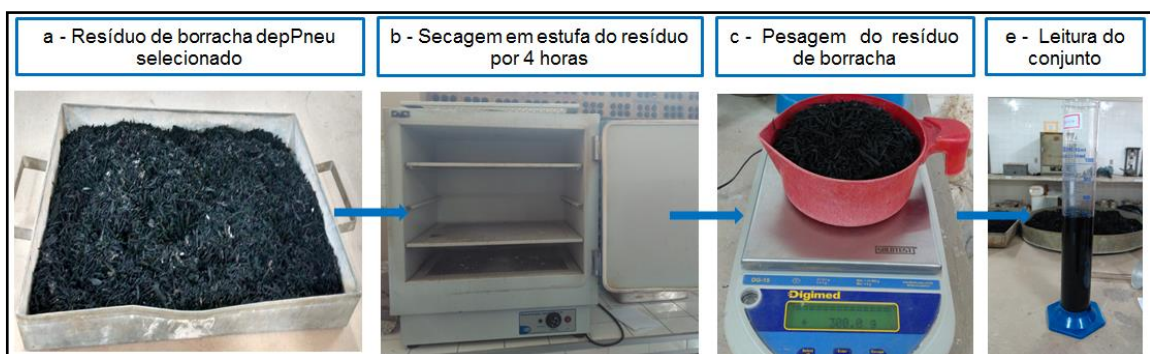


Fonte: Autor (2018)

3.3.1.4 Massa específica do resíduo de borracha

Para determinação da massa específica do resíduo de borracha, seguiu-se os procedimentos descritos na Norma ASTM C 792 (2015). Inicialmente, pesou-se duas amostras de 500 g, cada uma, que foram colocadas em estufa por um período de 4 horas, a uma temperatura de (110°C). Depois as amostras foram resfriadas ao ar, durante 2 horas, e então inseridas em uma proveta contendo querosene (utilizou-se este líquido devido à sua baixa massa específica), o que permitiu a total decantação do material 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 cm^3 ocupado pelo conjunto (querosene-agregado), conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23. Procedimento do ensaio da massa específica da borracha



Fonte: Autor (2018)

3.3.1.5 Massa unitária do agregado graúdo, agregado miúdo e resíduo de borracha

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

Existem diversos métodos para realização de uma dosagem. Este trabalho utilizou o método da ABCP (Associação Brasileira de cimento Portland) que é uma adaptação da norma ACI (*American Concrete Insitute*) para agregados brasileiros.

Após a caracterização dos agregados e do resíduo, primeiramente estipulou-se o fc_{j28} (resistência característica aos 28 dias) do concreto que seria produzido, através da Equação 1. Tendo em vista que o objetivo era avaliar a aplicabilidade deste material para peças e elementos pré-moldados, fixou-se o fck (resistência característica do concreto) em 35 MPa, conforme o que estabelece a NBR 9781 (ABNT, 2013), e utilizou-se o desvio padrão de (5,5), obtendo-se assim, um $fc_{j28} = 44,075$ MPa. Utilizando-se a curva de *Abrams*, estabeleceu-se a relação água/cimento em 0,45, chegando assim ao consumo de materiais necessários para a produção de $1m^3$ de concreto (sem adição de borracha), conforme mostra a Tabela 7. A apresentação do traço ficou da seguinte forma: (1:1,17:2,74). Foram utilizados três traços, sendo um de referência, denominado CR (sem adição de resíduo), e outros dois com adição de 6% - (CB6) e 9% (CB9) em massa de borracha, em relação ao agregado miúdo. Essas porcentagens de adição foram escolhidas devido aos estudos analisados na revisão bibliográfica terem demonstrado que frações na faixa de 5% a 10% de resíduo, proporcionavam bons resultados para o concreto.

$$fc_{j28} = fck + 1,65.sd \quad (1)$$

Tabela 7. 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) sem adição	CR	444,44	1216,6	518,3	200	0,00
(1: 1,17: 2,74) com adição de (6%)	CB6	444,44	1216,6	518,3	200	31,10
(1: 1,17: 2,74) com adição de (9%)	CB9	444,44	1216,6	518,3	200	46,65

Fonte: Autor (2018)

3.3.3 Fabricação do concreto

Primeiramente pesaram-se todas as quantidades de materiais necessários para a confecção dos traços para então seguir ao procedimento de produção do concreto, nesta ordem: umidificação da betoneira; colocação de todo o agregado graúdo (Figura 24 a); metade da areia (Figura 24 b); inserção de metade da água (Figura 24 c); mistura na betoneira por 1 minuto; adição de todo o cimento (Figura 24 d); adição do restante de areia; inserção da borracha (Figura 24 e) (para o traço de referência – pular essa etapa); homogeneização dos materiais na betoneira por mais 3 minutos (Figura 24 f), e; mistura do restante de água, rodando a betoneira por mais 2 minutos.

Figura 24. Fabricação do concreto

Fonte: Autor (2018)

Para verificar a consistência do concreto no estado fresco, retirou-se uma amostra que foi submetida ao ensaio do abatimento pelo tronco de cone (*slump test*), segundo o que estabelece a 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 (Figura 25 a) que sofreram, cada uma, 25 golpes com uma haste metálica (Figura 25 b). Logo após, retirou-se o excesso da superfície do molde (Figura 25 c) e então o cone foi levantado (Figura 25 d, e), 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 (Figura 25 f). Para cada um dos traços confeccionados obteve-se um *slump* diferente, sendo eles: 55 mm (para o CR); 40 mm (para o CB6) e; 25 mm (para o CB9).

Figura 25. Procedimento do ensaio pelo abatimento do tronco do cone



Fonte: Autor (2018)

A seguir, a mistura final foi colocada 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. A (Figura 26 a) ilustra o processo de moldagem e a (Figura 26 b) a aparência final dos concretos produzidos.

Figura 26. Moldagem (a), Aparência final do concreto (b).



Fonte: Autor (2018)

Para confecção dos corpos de prova, foram utilizadas fôrmas prismáticas e cilíndricas. As primeiras para os corpos de prova submetidos aos ensaios de tração na flexão e as últimas para os demais ensaios, conforme descrito na Tabela 8. Utilizou-se quatro amostras de cada traço para a realização dos ensaios de compressão axial simples, tração indireta por compressão diametral e tração na flexão, que foram rompidos nas idades de (7, 14 e 28 dias), com exceção dos corpos de prova de tração na flexão que foram rompidos somente aos 28 dias. Para o ensaio de módulo de elasticidade e absorção, foram selecionadas três amostras de cada traço, que também foram ensaiadas somente aos 28 dias. Ao todo foram feitos 102 corpos de prova.

Tabela 8. Descrição do total de corpos de prova produzidos

Nome do Ensaio	Nº de Composições	Nº Corpos de Prova por Idades de Rompimento (dias)			Formato dos corpos de prova	Nº total de corpos de prova
		7	14	28		
Compressão axial	3	4	4	4	Cilíndrico 10X20	36
Compressão diametral	3	4	4	4	Cilíndrico 10X20	36
Módulo de elasticidade	3	-	-	3	Cilíndrico 10X20	9
Absorção	3	-	-	3	Cilíndrico 10X20	9
Tração na flexão	3	-	-	4	Prismático 10x10x30	12
Total de Corpos de Prova Produzidos:						102

Fonte: Autor (2018)

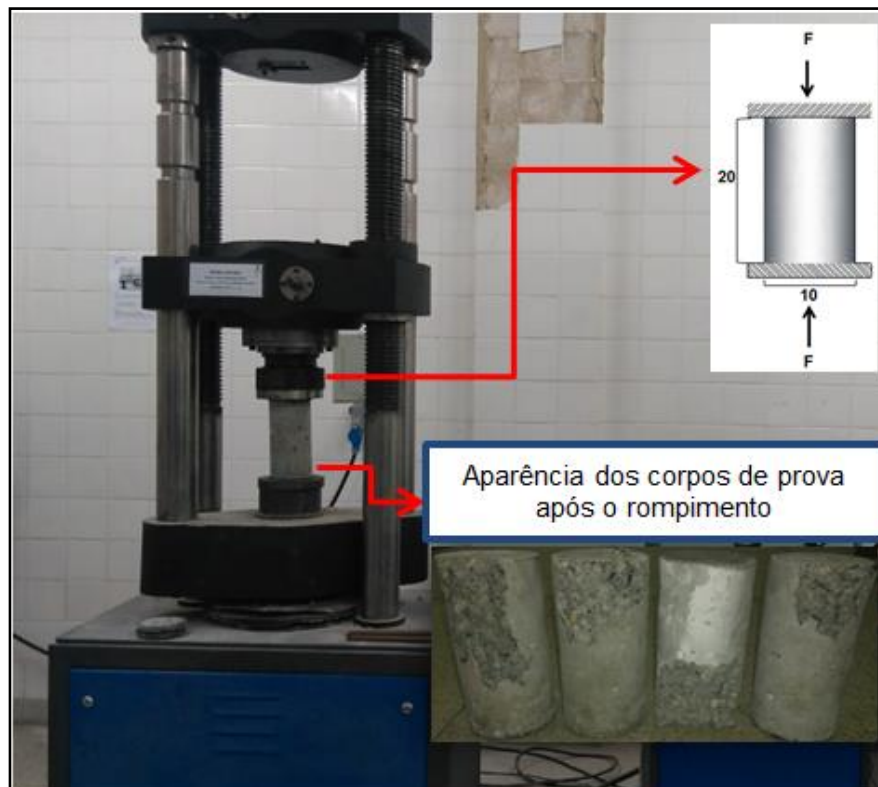
3.3.4 Ensaios físicos e mecânicos

3.3.4.1 Ensaio de resistência à compressão axial

Mehta e Monteiro (1994) definem a resistência como a “capacidade de um material resistir à tensão sem que haja a ruptura”. A falha é por vezes identificada com o aparecimento de fissuras. Dessa forma, a resistência está relacionada com a tensão suportada até o momento da ruptura. No caso do concreto, esta resistência é o valor máximo atingido durante a aplicação da carga.

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 27), 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 27. Ensaio de compressão axial



Fonte: Autor (2018)

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).

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

Onde:

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

3.3.4.2 Ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral

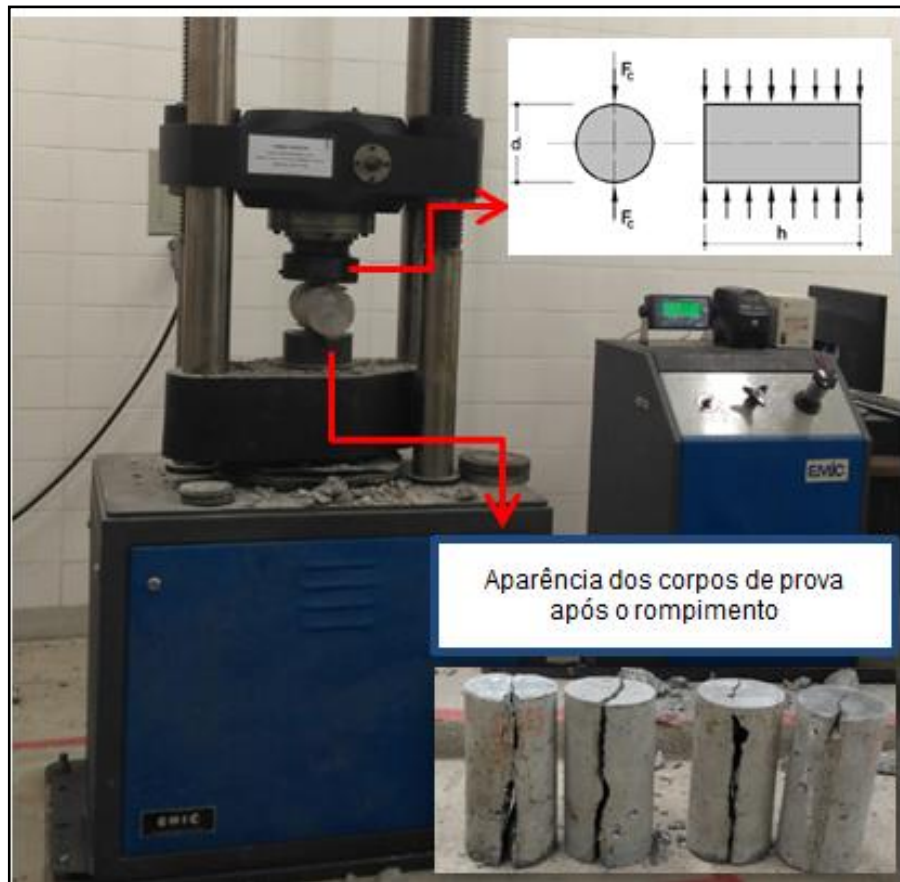
Para a determinação da resistência à tração indireta por compressão diametral dos compósitos produzidos, realizou-se um ensaio com base na NBR 7222 (ABNT, 2011). O procedimento consistiu em colocar cada um dos corpos de prova alojados ao longo de uma geratriz sobre o prato da máquina de compressão. Colocou-se entre estes pratos e o corpo de prova, duas tiras de metal isentas de defeitos e em seguida aplicou-se a força de compressão sobre a amostra de concreto até sua ruptura, conforme ilustrado na Figura 28. Este ensaio mede a quantidade de força necessária para romper um corpo de prova em seu sentido longitudinal e pode ser calculado a partir da (Equação 3), retirada da referida norma.

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (3)$$

Onde:

f_{ct} : resistência à compressão diametral, em MPa;
 F: força máxima obtida no ensaio, em N;
 d: diâmetro do corpo de prova, em mm;
 l: comprimento do corpo de prova, em mm.

Figura 28. Ensaio de compressão diametral



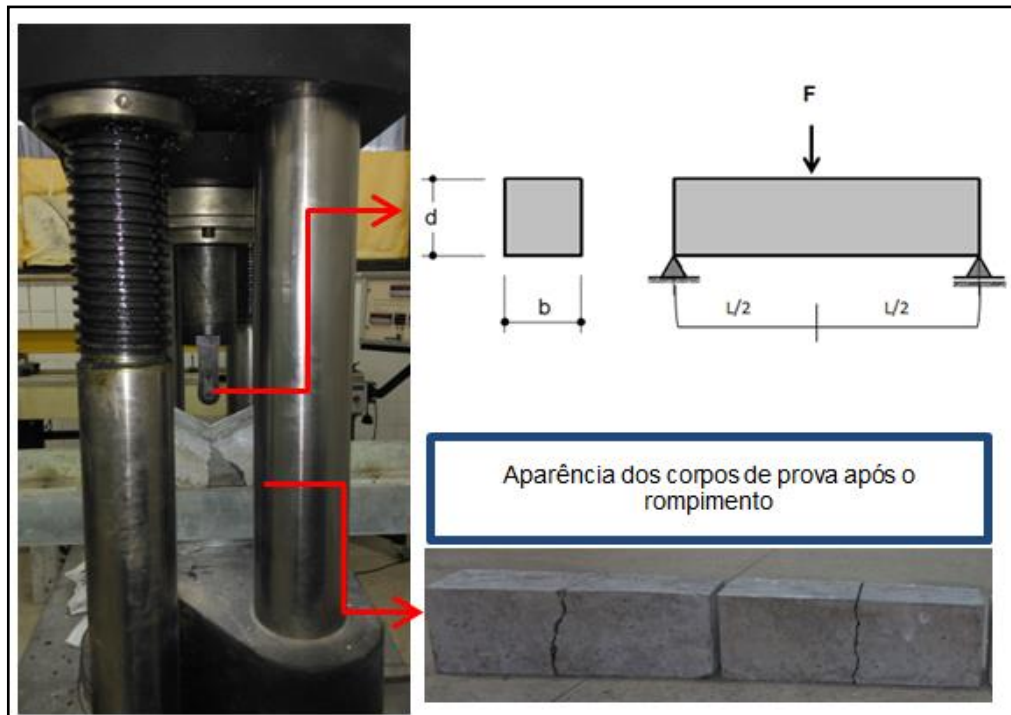
Fonte: Autor (2018)

3.3.4.3 Ensaio de resistência à tração na flexão em corpos de provas prismáticos

A resistência à flexão é expressa em termos de módulo de ruptura, que é a resistência máxima à ruptura calculada a partir da fórmula de flexão (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

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 28 dias de idade, sobre um suporte metálico de aço, onde o concreto ficou apoiado na base inferior através de dois cutelos. 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. A Figura 29 apresenta a execução do ensaio de tração na flexão.

Figura 29. Ensaio de tração na flexão



Fonte: Autor (2018)

Por fim, calculou-se a resistência à tração na flexão com aproximação de 0,01 MPa para os resultados individuais, utilizando a (Equação 4), retirada da ASTM C 293 (2016).

$$R = \frac{3 PL}{2 bd^2} \quad (4)$$

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;

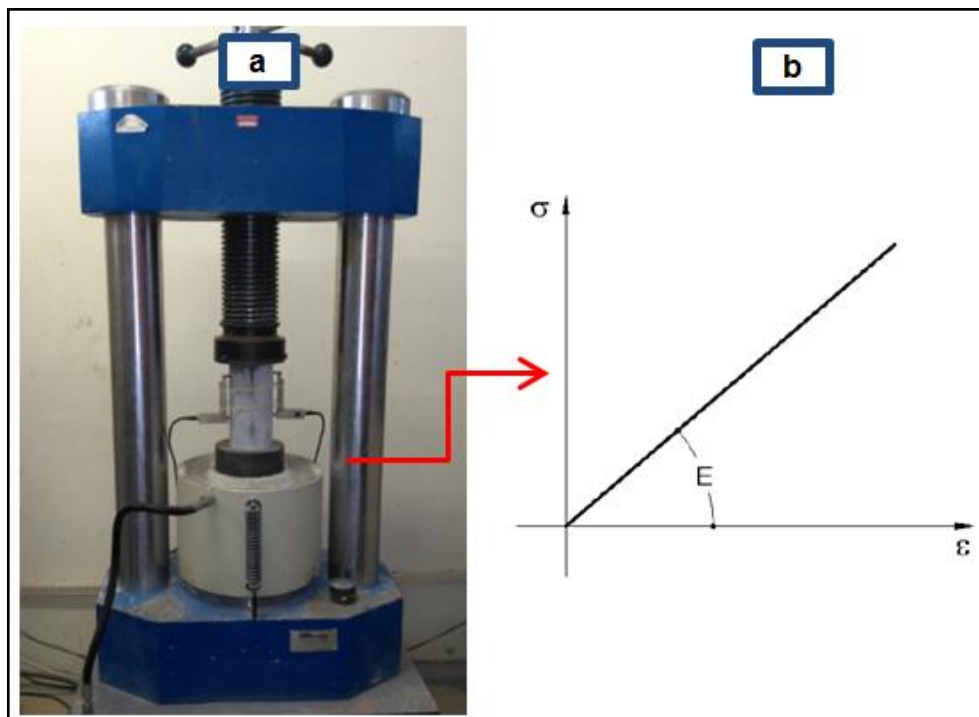
d: profundidade média da amostra na fratura, em polegadas ou mm.

3.3.4.4 Ensaio do módulo de elasticidade

Segundo Mehta Monteiro (2008), o módulo de elasticidade é definido como sendo a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite proporcional adotado. A declividade da curva tensão-deformação (Figura 30 b) é o módulo de elasticidade no concreto sob um carregamento uniaxial.

Para determinação do módulo de elasticidade do concreto foi utilizada a NBR 8522 (ABNT, 2017), que prescreve o método de ensaio para obtenção dessa grandeza. Foram utilizados 3 corpos de prova de cada traço, após 28 dias de cura. O procedimento iniciou-se com o posicionamento das amostras em uma prensa hidráulica, logo após foram colocados extensômetros elétricos até a meia altura dos corpos-de-prova, nas direções longitudinal e transversal (Figura 30 a), com o intuito de se obter as deformações nas duas direções, conforme prescreve a referida norma.

Figura 30. Ensaio do módulo de elasticidade



Fonte: Autor (2018)

Os módulos foram determinados através da equação 5 estabelecida na NBR 8522 (ABNT, 2017):

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad (5)$$

Onde:

E_{ci} : Módulo de elasticidade em GPa;

σ_b : é a maior tensão, em MPa;

0,5: é a tensão básica, em Mpa;

ε_b : é a maior deformação, em mm;

ε_a : é a deformação inicial, em mm.

3.3.4.5 Massa específica, absorção de água e índice de vazios

Determinou-se a massa específica, absorção de água e índice de vazios dos concretos de acordo com os procedimentos descritos na NBR 9778 (ABNT, 2009). Primeiramente retirou-se os corpos de prova da cura após 28 dias (Figura 31 a) e determinou-se a massa da amostra ao ar, em seguida foram colocadas na estufa a temperatura de (105 °C) (Figura 31 b), e determinou-se a massa (Figura 31 c) após intervalos de 24h, 48h e 72h de permanência na estufa, conforme ilustra a Figura 31.

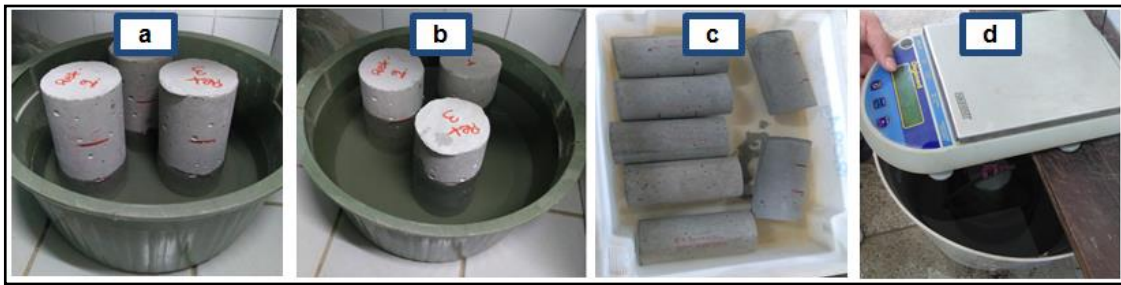
Figura 31. Ensaio de absorção e massa específica e índice de vazios



Fonte: Autor (2018)

Posteriormente, procedeu-se à imersão da amostra em água à temperatura (23 °C), de maneira gradual, primeiro 1/3 do seu volume nas primeiras 4 horas (Figura 32 a) e 2/3 nas 4 horas seguintes (Figura 32 b), sendo completamente submerso nas 64h restantes (Figura 32 c). Em cada uma das condições foi registrada a massa do corpo de prova. Completada esta etapa, a amostra foi posta em um cesto metálico submerso em um recipiente com água, e então determinou-se a massa da amostra totalmente submersa utilizando uma balança hidrostática (Figura 32 d).

Figura 32. Ensaio de absorção e massa específica e índice de vazios



Fonte: Autor (2018)

Após a realização destes procedimentos procedeu-se os cálculos de acordo com as equações a seguir:

- Absorção de água por imersão (%)

$$\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (6)$$

- Índice de vazios (%)

$$\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s - M_i} \times 100 \quad (7)$$

- Massa específica da amostra seca

$$\frac{M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \quad (8)$$

- Massa específica da amostra saturada

$$\frac{M_{\text{sat}}}{M_{\text{sat}} - M_i} \quad (9)$$

Onde:

M_{sat} = massa do corpo-de-prova saturado;

M_s = massa do corpo-de-prova seco em estufa;

M_i = massa do corpo-de-prova saturado, imerso em água;

3.3.4 Análise da morfologia da superfície de fratura

No estudo dos materiais de construção, sabe-se que há uma relação de dependência entre o processo de fabricação, sua microestrutura e suas propriedades.

Nos materiais cimentícios à base de cimento Portland é necessário o perfeito entendimento da relação entre a sua microestrutura e suas propriedades, a fim de se obter sistemas com melhor desempenho. Nesse sentido, a análise de imagens vem colaborar para melhorar o nível de conhecimento desses materiais, sendo uma ferramenta adequada para avaliar as mudanças morfológicas que ocorrem durante o seu processamento e seu uso. Por isso, este trabalho buscou analisar a morfologia da fratura do concreto através de imagens.

A Análise da superfície de fratura foi realizada para todos os traços produzidos. Após o rompimento dos corpos de prova, por meio do ensaio de compressão axial, foram selecionadas amostras do concreto, que foram retiradas com o auxílio de um disco de corte. Posteriormente, as amostras foram lavadas em água corrente e colocadas em estufa por um período de 2 horas à temperatura de 55°C. Após isso, foram feitas as análises macroscópicas em um estereoscópio e microscópicas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV). No primeiro caso buscou-se verificar as formas de arrancamento das fibras de borracha, e no segundo procurou-se observar a interface entre a borracha e a pasta cimentícia, bem como, seu grau de aderência.

Por fim, realizou-se a espectroscopia de dispersão de energia (EDS) que tem a função de contar e distribuir, em classes de energia, os raios-x produzidos por uma pequena região da amostra, resultando numa listagem dos elementos presentes no ponto analisado.

3.3.5 Análise quantitativa do benefício ambiental gerado pelo uso de resíduos de borracha de pneus em concreto

A fim de constatar os benefícios ambientais gerados pelo uso de resíduos de borracha de pneu de recauchutagem em concretos, procurou-se fazer uma análise quantitativa demonstrando o montante de resíduos que seriam reutilizados para produção do concreto alternativo, contribuindo desta maneira, para a logística reversa dos pneus inservíveis. Para a quantificação dos resíduos gerados em cada processo de recauchutagem utilizou-se informações retiradas do site da Associação Brasileira do Seguimento de Reforma de Pneus.

3.3.6 Análise da viabilidade econômica para produção de concreto com borracha

Tendo em vista a importância da avaliação da viabilidade econômica para a produção de concreto com uso de resíduos de recauchutagem de pneus, realizou-se uma análise comparativa entre o compósito tradicional e o modificado, para obtenção do valor de confecção de (1m³) de cada tipo de concreto. As quantidades individuais dos insumos foram obtidas por meio das composições que haviam sido formuladas e os preços de compra de cada um deles foram retirados da tabela de composições do SINAPI (2018) do estado do Pará. Considerou-se custo zero para o resíduo, tendo em vista que este material não necessitou passar por nenhum tratamento prévio para inserção no concreto e é considerado como um passivo ambiental, sendo descartado pelas fontes geradoras. Os valores finais apresentados são referentes apenas ao custo dos materiais para produção do concreto, não levando em consideração transporte e mão de obra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo busca apresentar os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados, bem como, as discussões e análises das propriedades físico-mecânicas do concreto com e sem adição de borracha.

4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Com os dados obtidos no ensaio de granulometria, formularam-se as Tabelas 9, 10 e 11. 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 9. Distribuição granulométrica do seixo

Seixo								
Abertura das peneiras (mm)	Primeira amostra			Segunda amostra			%Retida Média	%Ret. Acum. Média
	Peso Amostra (g)	% Retida	% Ret. Acum.	Peso Amostra (g)	% Retida	% Ret. Acum.		
12,5	1236,2	24,7	24,7	1268	25,4	25,4	25	25,0
9,5	1888,6	37,7	62,4	1708,1	34,2	59,6	36	61,0
6,3	1216,5	24,3	86,7	1171,3	23,4	83	24	85,0
4,75	452,1	9	95,7	550,4	11	94	10	95,0
2,36	180,2	3,6	99,3	257,5	5,2	99,2	4	99,0
1,18	14,7	0,3	99,6	14,7	0,3	99,5	0	100,0
0,6	6,9	0,1	99,7	5,9	0,1	99,6	0	100,0
0,3	5,5	0,1	99,8	5,5	0,1	99,7	0	100,0
0,15	4,4	0,1	99,9	5,9	0,1	99,8	0	100,0
0,075	4,2	0,1	100	4,3	0,1	99,9	0	100,0
FUNDO	5,5	0,1	100	5,3	0,1	100	0	100,0
Total	5014,8			4997				
Caracterização		Observações:						
MF =	6,55	NBR NM 248/2003 - Agregados - Determinação da composição granulométrica						
D. Max. (mm) =	19,0							

Fonte: Autor (2018)

Onde:

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

% Retida = porcentagem individual de material retido na peneira;

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

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

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

MF = módulo de finura dos agregados;

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

Tabela 10. Distribuição granulométrica da areia

Areia								
Abertura das peneiras (mm)	Primeira amostra			Segunda amostra			%Retida Média	%Ret. Acum. Média
	Peso Amostra (g)	% Retida	% Ret. Acum.	Peso Amostra (g)	% Retida	% Ret. Acum.		
6,3	1,6	0,20	0,2	1,6	0,20	0,2	0	0,2
4,75	1,7	0,20	0,4	1,1	0,10	0,3	0	0,4
2,36	7,4	0,70	1,1	7,2	0,70	1,0	1	1,1
1,18	39,2	3,90	5,0	40,5	4,00	5,0	4	5,0
0,6	101,2	10,10	15,1	104,2	10,40	15,4	10	15,3
0,3	548,5	55,00	70,1	561,7	55,80	71,2	55	70,7
0,15	180,3	18,10	88,2	175,5	17,40	88,6	18	88,4
0,075	81,7	8,20	96,4	81,4	8,10	96,7	8	96,6
FUNDO	35,6	3,60	100,0	33,1	3,30	100,0	3	100,0
Total	997,2			1006				
Caracterização		Observações:						
MF =	1,80	NBR NM 248-2003 - Agregados - Determinação da composição granulométrica						
D. Max. (mm)=	1,18							

Fonte: Autor (2018)

Tabela 11. Distribuição granulométrica do resíduo de borracha

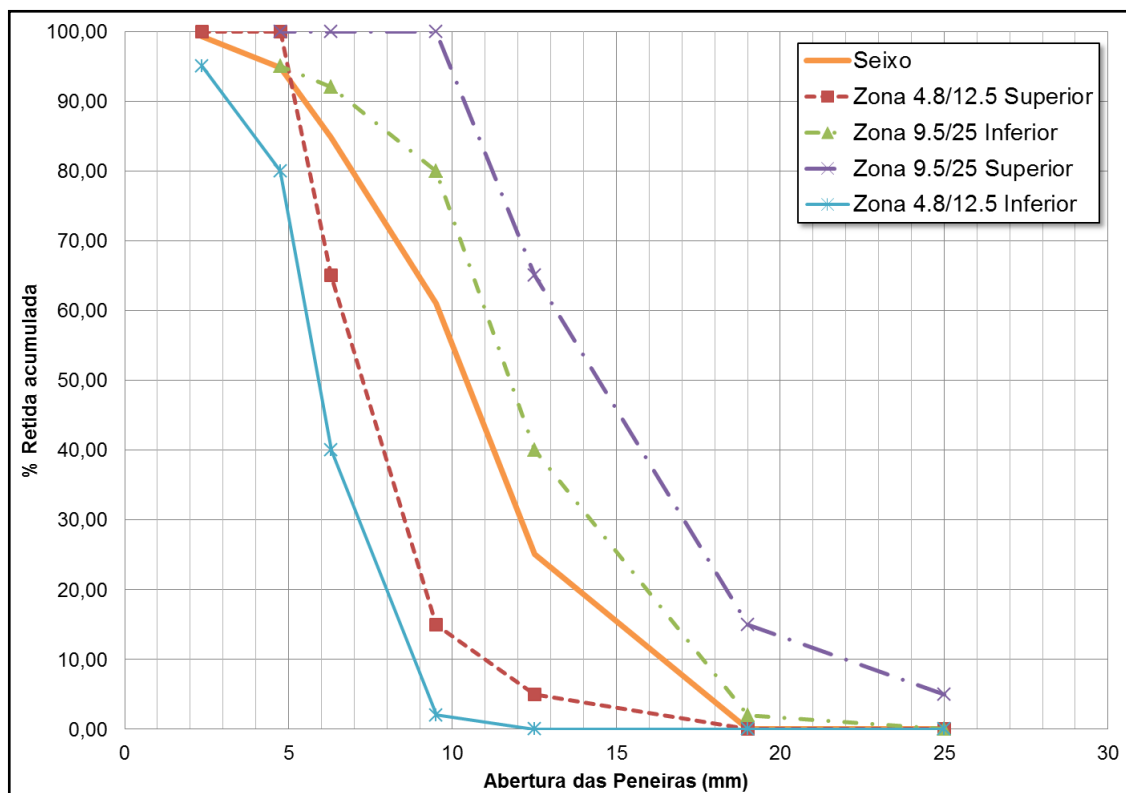
Borracha								
Abertura das peneiras (mm)	Primeira amostra			Segunda amostra			%Retida Média	%Ret. Acum. Média
	Peso Amostra (g)	% Retida	% Ret. Acum.	Peso Amostra (g)	% Retida	% Ret. Acum.		
6,3	9,1	3,00	3,0	9	3,00	3,0	3,0	3,0
4,75	19,8	6,60	9,6	19,3	6,50	9,5	7,0	9,6
2,36	135,8	45,40	55,0	138,5	46,40	55,9	46,0	55,5
1,18	113,5	37,90	92,9	111,5	37,30	93,2	38,0	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 composição granulométrica						
D. Max. (mm)=	6,3							

Fonte: Autor (2018)

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 encontra-se entre os limites superiores e inferiores dos parâmetros desse tipo de agregado.

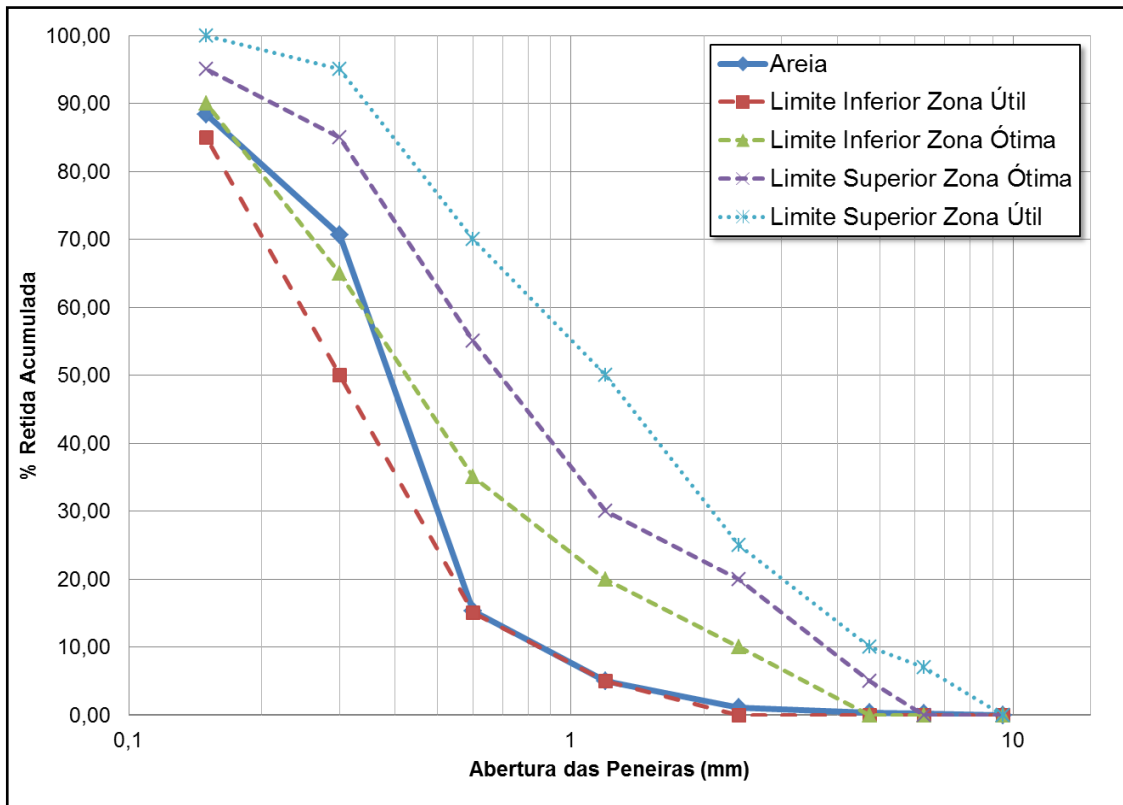
Os Gráficos 2, 3 e 4 apresentam a curva de distribuição granulométrica do seixo, areia e da borracha, respectivamente. Pode-se observar que o resíduo de borracha apresenta uma distribuição bem uniforme, tendo seu maior percentual retido na peneira com malha de abertura de 2,36 mm, enquanto que o seixo 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.

Gráfico 2. Curva de distribuição granulométrica do seixo



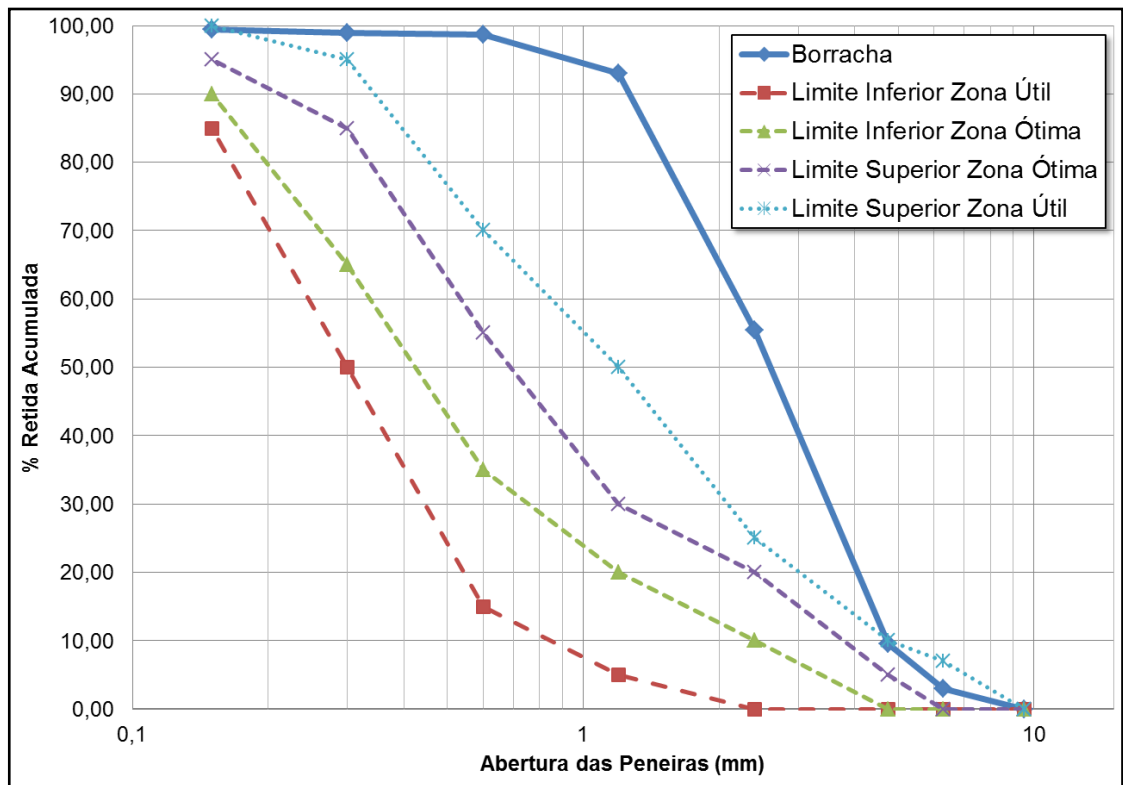
Fonte: Autor (2018)

Gráfico 3. Curva de distribuição granulométrica da areia



Fonte: Autor (2018)

Gráfico 4. Curva de distribuição granulométrica da borracha



Fonte: Autor (2018)

4.2 MASSA UNITÁRIA E ESPECÍFICA

Em relação à massa específica e massa unitária, os valores obtidos nos ensaios estão descritos na Tabela 12. Verifica-se que, a borracha possui uma baixa massa específica e massa unitária em relação ao seixo e a areia. Como não existe uma normatização específica para a caracterização do resíduo de borracha, acredita-se que as diferenças entre os diversos métodos utilizados para realização dos ensaios possa influenciar nos resultados finais. No entanto, os valores obtidos na presente pesquisa estão em consonância com as informações vistas nas literaturas pesquisadas, onde a massa unitária varia de 0,27 a 0,50 g/cm³, enquanto que a massa específica mais recorrente é de 1,14 g/cm³.

Tabela 12. Massa unitária e específica dos agregados

Agregado	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Unitária (g/cm ³)
Seixo	2,65	1,58
Areia	2,63	1,69
Resíduo de Borracha	1,11	0,35

Fonte: Autor (2018)

4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

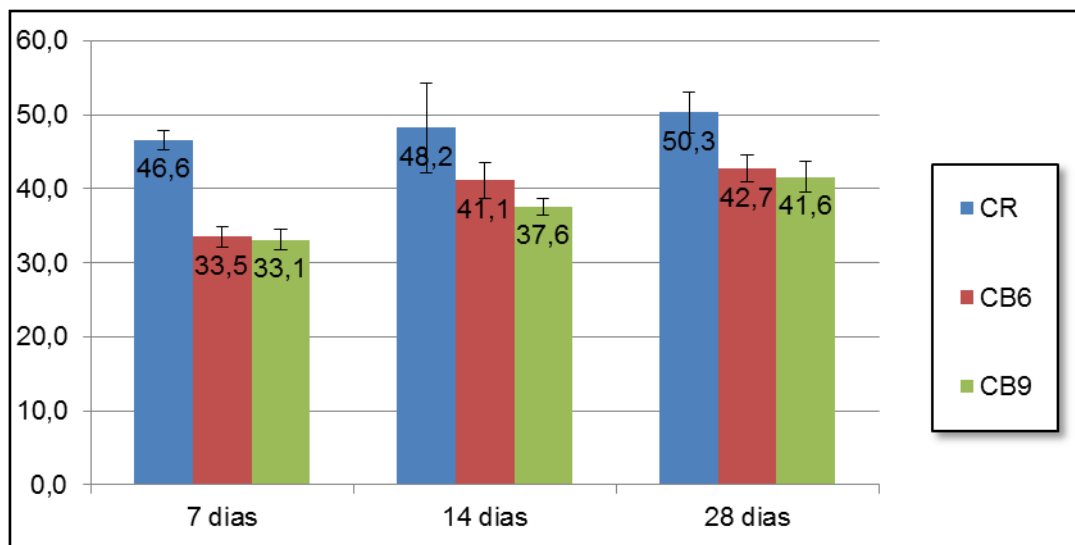
A Tabela 13 apresenta os resultados individuais dos 4 corpos de prova utilizados para cada traço, a média aritmética e o desvio padrão dos resultados de compressão axial simples.

O Gráfico 5 apresenta os resultados dos ensaios de compressão axial simples que foram realizados aos 7, 14 e 28 dias de cura do concreto. Observa-se que a adição de borracha promove a queda gradativa da resistência do concreto, fato este que já era esperado, tendo em vista os resultados verificados nas literaturas existentes sobre o tema, (ALTOÉ, 2017; MOREIRA, FIDELIS e DIAS, 2014; BRITO, 2013; ROMUALDO *et al.*, 2011; ; LINTZ e BARBOSA, 2010; FIORITI *et al.*, 2007; FIORITI *et al.*, 2001). Estes autores atribuíram esse fenômeno à fraca aderência entre a borracha e a matriz cimentícia. No entanto, devido à aplicação final proposta para esse compósito ser a confecção de elementos e peças pré-moldadas, preferencialmente pisos para baixo tráfego, o objetivo deste trabalho foi alcançado, pois a menor resistência obtida foi referente ao CB9 com 41,6 MPa. Esse valor está acima dos 35 MPa estabelecidos pela NBR 9781 (ABNT, 2013).

Tabela 13. Resultados dos ensaios de compressão axial simples

Corpos de prova	Compressão axial (MPa)								
	CR			CB6			CB9		
	7 dias	14 dias	28 dias	7 dias	14 dias	28 dias	7 dias	14 dias	28 dias
1°	44,8	56,5	52,6	33,5	40,8	41,9	35,0	36,8	42,9
2°	46,5	45,2	47,2	34,1	38,8	41,9	32,3	39,1	43,3
3°	47,7	42,6	52,6	31,5	44,4	41,5	32,8	37,8	38,8
4°	47,6	48,4	48,7	34,9	40,2	45,4	32,1	36,7	41,3
Média	46,6	48,2	50,3	33,5	41,1	42,7	33,1	37,6	41,6
Desvio Padrão	1,32	6,03	2,72	1,43	2,40	1,81	1,35	1,11	2,03
Perda de Resistência	-	-	-	-28,17%	-14,74%	-15,14%	-29,11%	-21,97%	-17,27%

Fonte: Autor (2018)

Gráfico 5. Resistência à compressão axial

Fonte: Autor (2018)

Os resultados dos ensaios de compressão axial demonstram que existe uma relação inversamente proporcional entre a quantidade de borracha inserida no concreto e sua queda de resistência. Entre os quatro corpos de prova utilizados para cada ensaio, 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 7 dias o concreto com borracha, tanto o CB6 quanto o CB9 apresentam uma queda de resistência de aproximadamente 30% em relação ao CR, sendo que aos 28 dias essa diferença diminui para 15,14% e 17,27% para o compósito com adição de 6 e 9%, respectivamente. Estes resultados se mostram satisfatórios,

tendo em vista os trabalhos realizados por outros autores, como 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%, e Fioriti *et al.*,(2007), que observaram uma queda de 18, 13% de resistência para o concreto com adição de 8% de resíduo de borracha e 22,46% para o adicionado com 10%. É válido ressaltar, no entanto, que os trabalhos citados realizaram a substituição em fração parcial em massa de agregado miúdo pelo resíduo de borracha, enquanto que na presente pesquisa foi feita apenas a adição.

4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Tabela 14 mostra os valores individuais, a média aritmética e o desvio padrão dos resultados obtidos nos ensaios realizados aos 7, 14 e 28 dias. Nota-se que as reduções de resistência são superiores para as primeiras idades, enquanto que para o ensaio realizado aos 28 dias, o CB6 teve uma redução de apenas 11,89%, e o CB9 reduziu 14,25% em relação ao CR.

Tabela 14. Resultados dos ensaios de tração indireta por compressão diametral

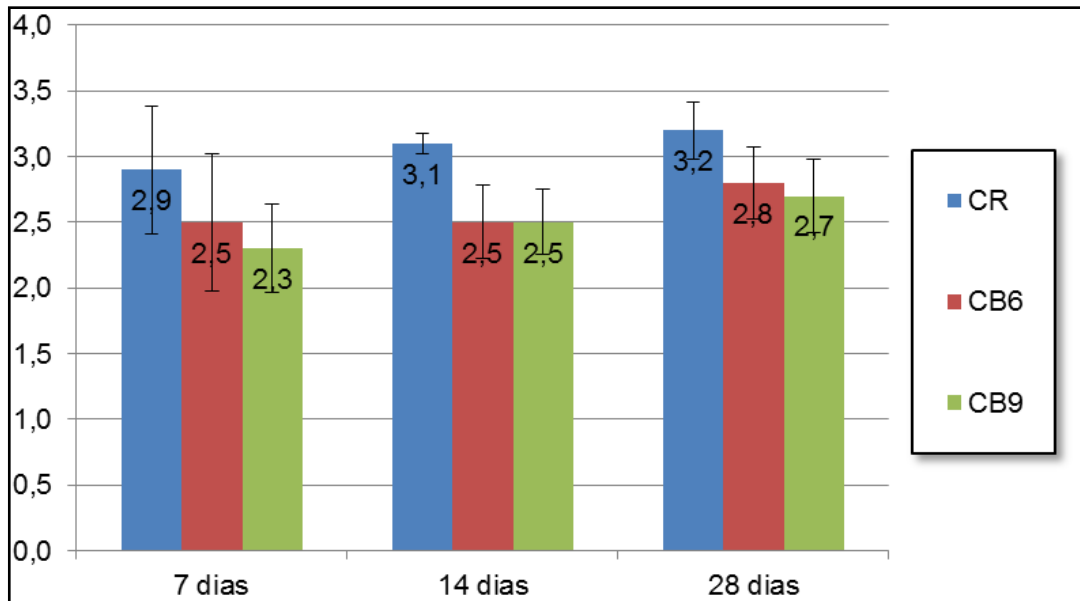
Corpos de prova	Tração Indireta por Compressão Diametral (MPa)								
	CR			CB6			CB9		
	7 dias	14 dias	28 dias	7 dias	14 dias	28 dias	7 dias	14 dias	28 dias
1°	3,5	2,9	3,2	1,8	2,9	2,9	1,9	2,3	2,5
2°	2,3	3,1	3,2	2,8	2,5	2,8	2,7	2,8	3,1
3°	3,1	3,1	3,4	2,3	2,2	2,4	2,2	2,3	2,5
4°	2,8	3,1	2,9	3,0	2,3	3,1	2,5	2,5	2,7
Média	2,9	3,1	3,2	2,5	2,5	2,8	2,3	2,5	2,7
Desvio Padrão	0,48	0,08	0,22	0,53	0,28	0,28	0,34	0,25	0,28
Perda de Resistência	-	-	-	-15,22%	-18,22%	-11,89%	-19,83%	-18,48%	-14,25%

Fonte: Autor (2018)

No Gráfico 6, podem ser observadas as médias aritméticas dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração indireta por compressão diametral dos concretos produzidos. Verifica-se que, da mesma forma que no ensaio de resistência axial, a inserção de resíduos de borracha propiciou uma redução nas propriedades mecânicas do compósito. Estes dados estão

de acordo os resultados encontrados por diversos autores como (ALTOÉ, 2017; MOREIRA, FIDELIS e DIAS, 2014; BRITO, 2013; ROMUALDO *et al.*, 2011; ; LINTZ e BARBOSA, 2010; FIORITI *et al.*, 2007; FIORITI *et al.*, 2001). De acordo com Albuquerque *et al.*, (2006), o maior teor de borracha incorporado ao concreto, resulta em um aumento gradual do teor de ar incorporado, o que faz com que ocorra redução em sua resistência.

Gráfico 6. Resistência à tração indireta por compressão diametral



Fonte: Autor (2018)

4.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

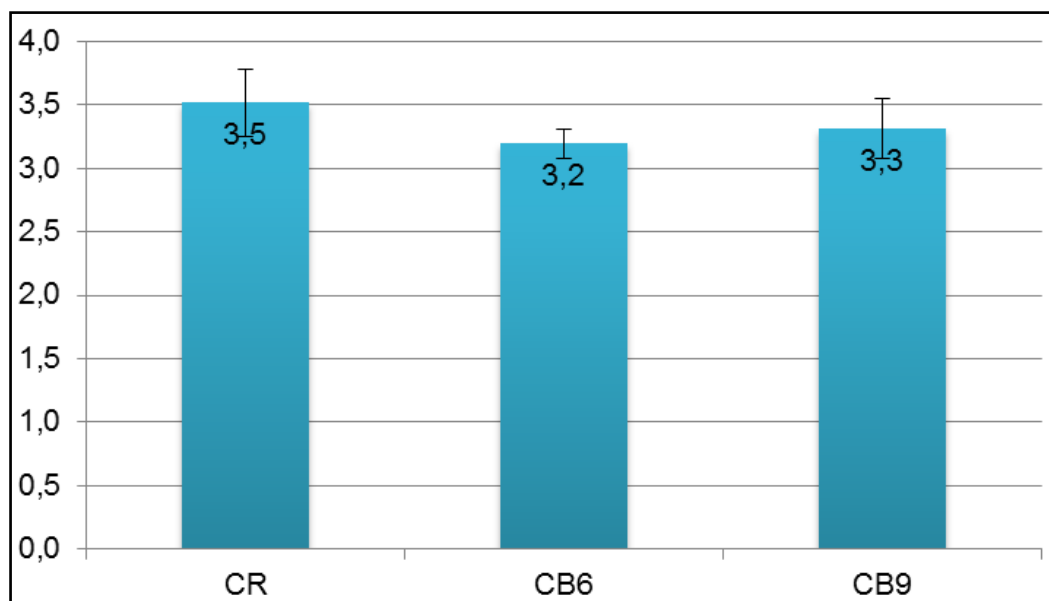
Na Tabela 15, é possível observar os valores individuais dos 4 corpos de prova utilizados para cada traço, a média aritmética e o desvio padrão dos resultados obtidos no ensaio de tração na flexão. Os dados demonstram que o CB9 apresentou uma menor queda na resistência à tração quando comparado ao CB6, que teve uma redução de 9,15%. Também se verificou que os corpos de prova utilizados não apresentaram significativo desvio nos resultados para cada composição analisada.

No Gráfico 7, é possível visualizar a média aritmética dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial que foi realizado aos 28 dias. Apesar de ter havido uma diminuição da resistência à tração, nota-se que os valores são muito aproximados, sendo que o CB9 apresentou um melhor resultado em relação ao CB6.

Tabela 15. Resultados dos ensaios de tração na flexão

Corpos de prova	Tração na Flexão (MPa)		
	CR 28 dias	CB6 28 dias	CB9 28 dias
1°	3,2	3,3	3,6
2°	3,9	3,2	3,0
3°	3,5	3,2	3,2
4°	3,5	3,0	3,4
Média	3,5	3,2	3,3
Desvio Padrão	0,26	0,12	0,24
Perda de Resistência	-	-9,15%	-5,88%

Fonte: Autor (2018)

Gráfico 7. Resistência à tração na flexão - 28 dias (MPa)

Fonte: Autor (2018)

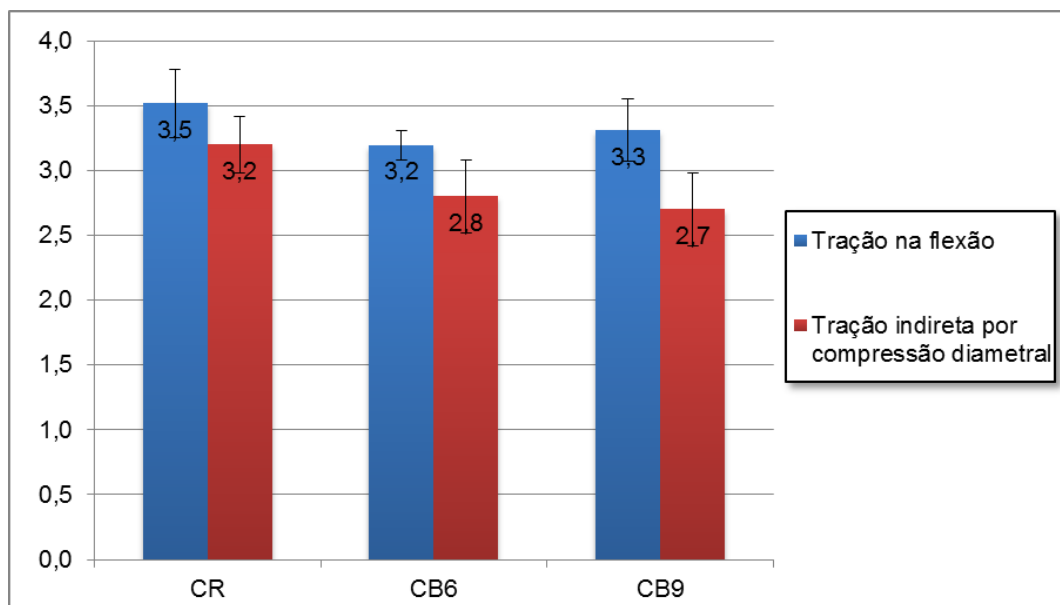
A NBR 9781 (ABNT, 2013) não estabelece critérios quanto à resistência à tração, porém, algumas normas internacionais já utilizam este parâmetro para a avaliação da resistência mecânica dos pisos de concreto.

A norma europeia BS EN –1338 (2003) utiliza o ensaio de tração indireta com corpos de prova cilíndricos, e a norma SANS 1058 (2009) da África do Sul estipula que a resistência à tração para tráfego leve deve ser de 2,2 MPa e de 2,8 MPa para tráfego pesado. Dessa forma, os concretos com adição de borracha produzidos neste trabalho estariam de acordo com o que tais normas preveem para sua utilização em vias de baixo tráfego.

Os resultados encontrados neste trabalho também estão condizentes com bibliografia sobre o tema, que apresenta menores valores para o concreto com adição de borracha em relação ao concreto tradicional (ALTOÉ, 2017; MOREIRA, FIDELIS e DIAS, 2014; BRITO, 2013; ROMUALDO *et al.*, 2011; ; LINTZ e BARBOSA, 2010; FIORITI *et al.*, 2007; FIORITI *et al.*, 2001).

O Gráfico 8 mostra o comparativo entre os resultados dos ensaios de resistência à tração indireta por compressão diametral e resistência à tração na flexão, realizados aos 28 dias de cura do concreto. Observa-se que não houve grande diferença nos valores, sendo que, as variações correspondem a (8,57%), (12,5%) e (18,18%) para o CR, CB6 e CB9, respectivamente. Isto indica uma uniformidade nos resultados de ambos os ensaios, o que gera maior confiabilidade nos valores aferidos.

Gráfico 8. Comparativo entre resistência à tração indireta por compressão diametral e tração na flexão



Fonte: Autor (2018)

4.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Na Tabela 16, é possível verificar que o CB6 apresentou uma baixa no módulo de elasticidade da ordem de 3,09%, enquanto que o CB9 reduziu o valor em relação ao CR em 5,09%. Ao analisar os resultados individuais, verifica-se que não há grande discordância nos resultados.

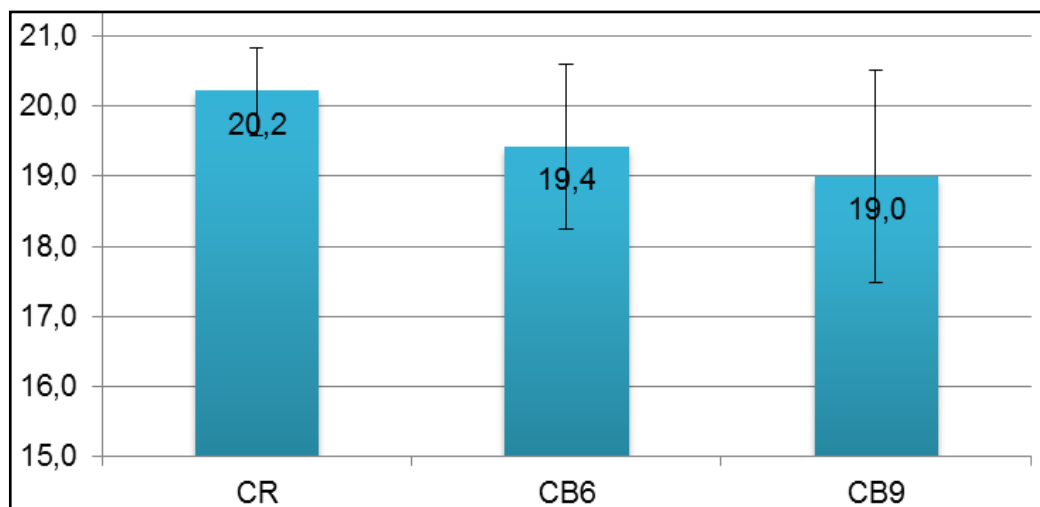
O Gráfico 9 mostra as médias aritméticas dos resultados de três corpos de prova de cada traço, que foram analisados aos 28 dias. É notável que houve uma pequena queda nesta propriedade, sendo que a diminuição do módulo é inversamente proporcional ao aumento do teor de resíduo de borracha incorporado. No Apêndice A deste trabalho, constam os gráficos individuais formulados para avaliar o módulo de elasticidade do concreto.

Tabela 16. Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade

Corpos de prova	Módulo de Elasticidade (GPa)		
	CR	CB6	CB9
	28 dias	28 dias	28 dias
1°	20,2	20,5	20,5
2°	20,8	18,2	17,5
3°	19,1	19,6	19,0
Média	20,02	19,4	19,0
Desvio Padrão	0,62	1,18	1,52
Perda de Resistência	-	-3,09%	-5,09%

Fonte: Autor (2018)

Gráfico 9. Módulo de elasticidade (GPa)



Fonte: Autor (2018)

Os valores obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dos concretos com adição de borracha apresentaram-se inferiores aos encontrados no concreto de referência, sendo que conforme se aumenta o teor de resíduo, diminui-se o valor desta propriedade. Isto está de acordo com Santos (2016), que constatou em sua dissertação de mestrado que a resistência à compressão do concreto é diretamente proporcional ao módulo de elasticidade e, por isso, quanto maior o teor de borracha incorporado ao concreto, menor seria essa variável. Neville (2007) explica esse fenômeno afirmando que o módulo de elasticidade do agregado influencia diretamente as propriedades elásticas do concreto, sendo proporcional ao módulo de elasticidade do compósito. Como a borracha possui um baixo valor para esta variável em relação aos agregados tradicionais, é justificável a diminuição dessa propriedade nos concretos com adição deste material. Isso é um efeito favorável quando se pensa na utilização das misturas em peças que necessitam de um maior grau de deformabilidade para a redistribuição dos esforços.

A diminuição do módulo de elasticidade estabelece uma maior capacidade de deformação do concreto antes da ruptura, mesmo com a diminuição de sua resistência, assim como maior proporcionalidade na relação entre a resistência à tração pela resistência a compressão para os traços com adição de borracha. Isso faz com que o concreto modificado seja menos frágil que o convencional.

4.7 MASSA ESPECÍFICA, ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

A Tabela 17 apresenta os resultados individuais dos 3 corpos de prova utilizados para cada traço, a média aritmética dos valores obtidos, o desvio padrão, e as porcentagens de variação em cada um dos fatores analisados. Observa-se que o desvio padrão é muito pequeno, sendo que, para as amostras estudadas não houve grande dispersão nos resultados.

O Gráfico 10 apresenta os resultados obtidos para as três variáveis analisadas. Observa-se que o CB9 apresentou uma menor absorção de água (0,19%) em relação ao CR, demonstrando que este compósito possui um menor número de poros permeáveis. No entanto, não foi observada uma relação diretamente proporcional com o teor de borracha adicionado, tendo em vista que o CB6 teve um resultado de absorção superior ao CR de (10,86%). Estas discordâncias podem estar relacionadas às diferenças de energia de compactação no processo de adensamento manual.

Os resultados obtidos são semelhantes aos encontrados por Fioriti *et al.*, (2007), que ao proporem a substituição parcial da areia por resíduo de borracha constataram que absorção de água não é afetada de maneira significativa.

Tabela 17. Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Absorção de água por imersão (%)			
	Referência	6% de Adição	9% de Adição
Cp1	5,12%	5,85%	5,20%
Cp2	5,31%	5,88%	5,24%
Cp3	5,32%	5,95%	5,26%
Média aritmética	5,25%	5,89%	5,24%
Desvio Padrão	0,11	0,05	0,03
Variação	-	+ 10,86%	- 0,19%
Índice de vazios (%)			
Cp1	11,80%	13,04%	11,76%
Cp2	12,17%	13,09%	11,79%
Cp3	12,20%	13,24%	11,87%
Média aritmética	12,06%	13,12%	11,81%
Desvio Padrão	0,22	0,10	0,06
Variação	-	+ 8,08	- 2,07
Massa específica da amostra seca (g/cm³)			
Cp1	2,294	2,224	2,250
Cp2	2,294	2,227	2,255
Cp3	2,307	2,228	2,260
Média aritmética	2,30	2,23	2,26
Desvio Padrão	0,72	0,21	0,50
Variação	-	- 3,04%	- 1,74%

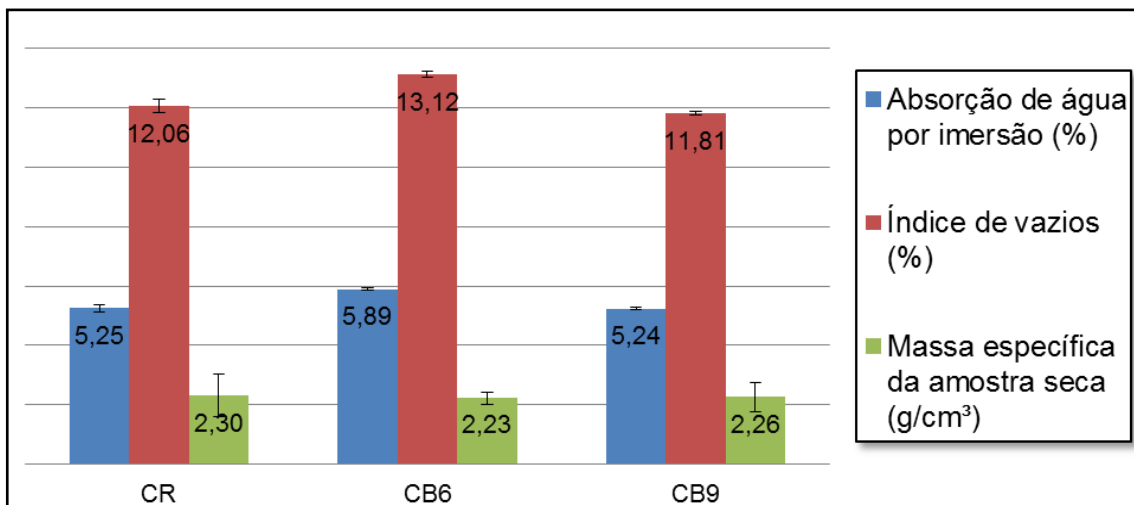
Fonte: Autor (2018)

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), a absorção de água, expressa em porcentagem, representa a porosidade do concreto, devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco. Para concretos aplicados em pavimentação, esta norma estabelece que os valores médios de absorção não devem ser superiores a 6% e os individuais não devem ultrapassar 7%. Dessa forma, os três traços analisados neste trabalho estariam em consonância com tais exigências.

Em relação ao índice de vazios, os resultados são praticamente iguais aos da absorção, dada a relação direta entre estas duas variáveis. No que diz respeito à massa específica, foi observado que o CB6 teve uma redução de 3,04% em relação ao CR, enquanto que o CB9 reduziu 1,74%.

Era esperado que o concreto com maior adição de borracha apresentasse menor massa específica. No entanto, devido ao traço com teor de 9% ter apresentado uma menor quantidade de poros, e conseqüentemente menor teor de ar incorporado, isso não ocorreu. Mesmo assim, os resultados obtidos são satisfatórios, demonstrando que a adição de borracha proporciona maior leveza ao concreto sem aumentar de forma significativa a sua absorção.

Gráfico 10. Massa específica, absorção de água e índice de vazios



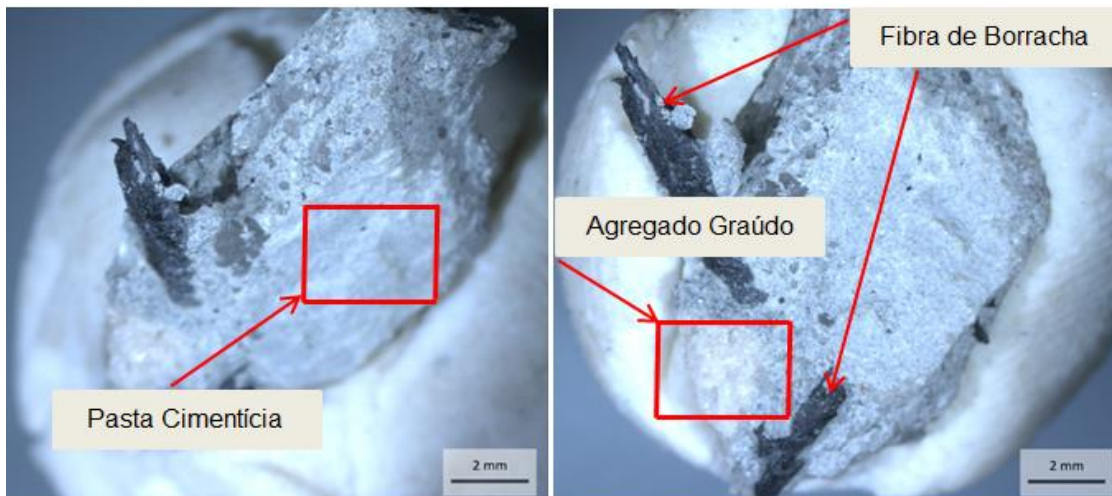
Fonte: Autor (2018)

4.9 ANÁLISE DA MORFOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE FRATURA

Devido ao resíduo de borracha utilizado nesta pesquisa possuir uma distribuição de tamanhos e formas bem heterogêneas, primeiramente foi feita a verificação da macroestrutura das amostras com o auxílio de um Estereoscópio Eletrônico. Dessa forma foi possível observar as formas de arrancamento das fibras do concreto, bem como a adesão da borracha à pasta cimentícia.

Na Figura 33, observam-se as fases (agregado graúdo, pasta de cimento e resíduo de borracha) do CB6, e a Figura 34 apresenta as formas de aderência entre a matriz cimentícia e as fibras de borracha no CB9.

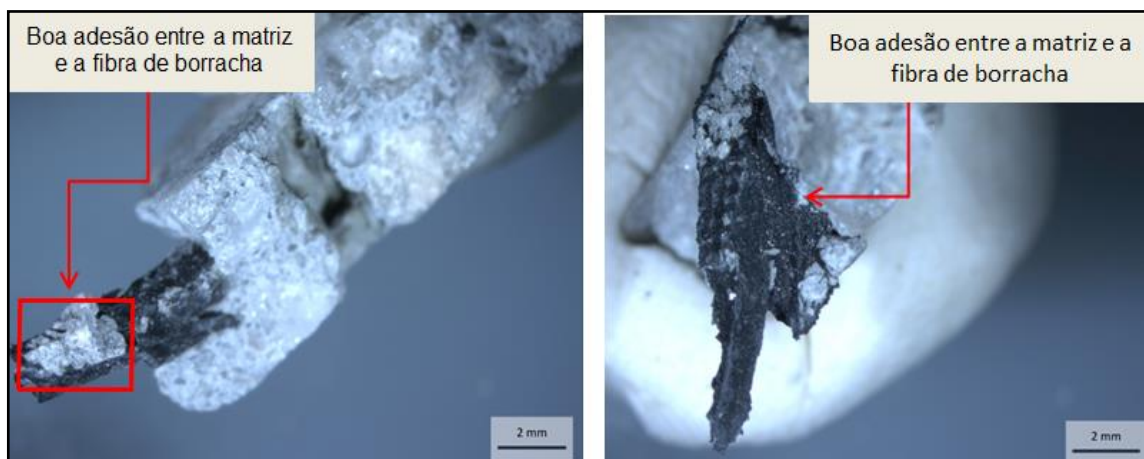
Figura 33. Análise macroscópica das amostras com adição de 6% de borracha – aumento de 6.3x



Fonte: Autor (2018)

Nota-se que houveram áreas com boa aderência entre a pasta de cimento e a fibra de borracha, sendo que o arrancamento, em sua maior parte, ocorreu por rompimento da fibra e não por *Pull-out*. Levando-se em consideração que não foi utilizada nenhuma forma de tratamento prévio nas fibras, e que por isso a aderência ocorreu apenas em decorrência da estrutura morfológica da borracha, sendo, portanto, somente de natureza mecânica, os resultados se mostram satisfatórios.

Figura 34. Análise macroscópica das amostras com adição de 9% de borracha – aumento de 6.3x



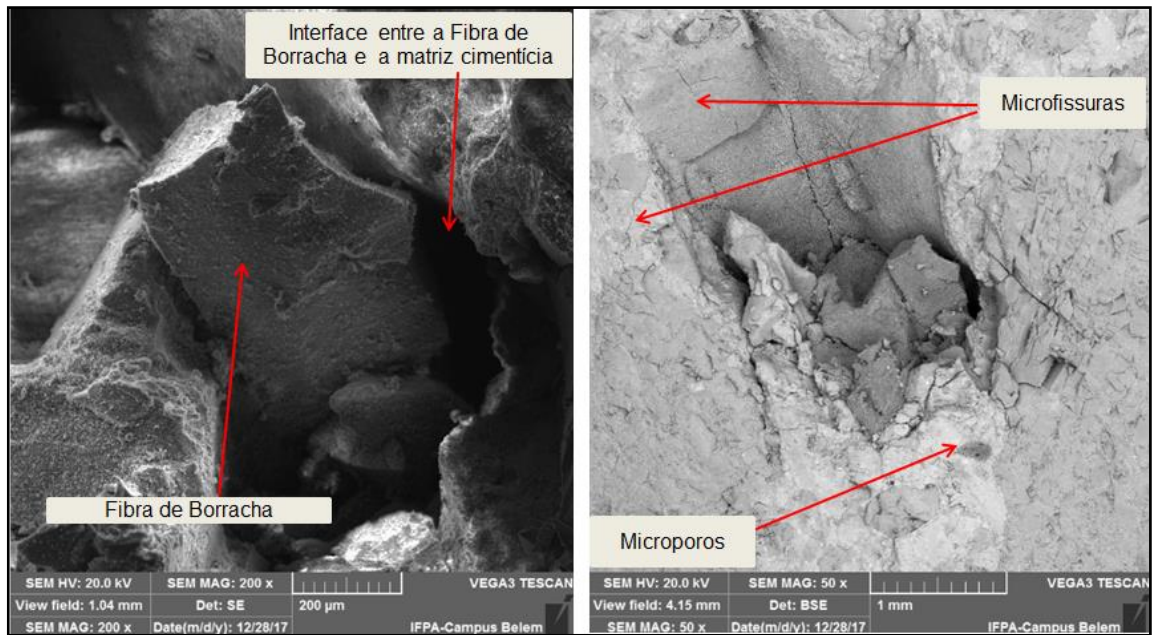
Fonte: Autor (2018)

As análises microscópicas foram feitas utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV), juntamente com análise de imagens por espectroscopia de dispersão de energia (ESD), a fim de determinar a composição química aproximada de alguns pontos de interesse.

A Figura 35 apresenta as imagens do MEV no CB6. Nela é possível observar a interface entre a fibra de borracha e matriz cimentícia. Também se verifica que o compósito com inserção de 6% de borracha apresenta algumas microfissuras, bem como microporos; estes dois fatores contribuem para explicar a queda nas propriedades mecânicas deste tipo de concreto, tendo em vista que a maior porosidade do material possibilitou a diminuição de sua resistência. A Figura 36 também mostra os microporos presentes no concreto com adição de 9% e o *Pull-out* da fibra de borracha indicando baixa aderência com a matriz em algumas regiões.

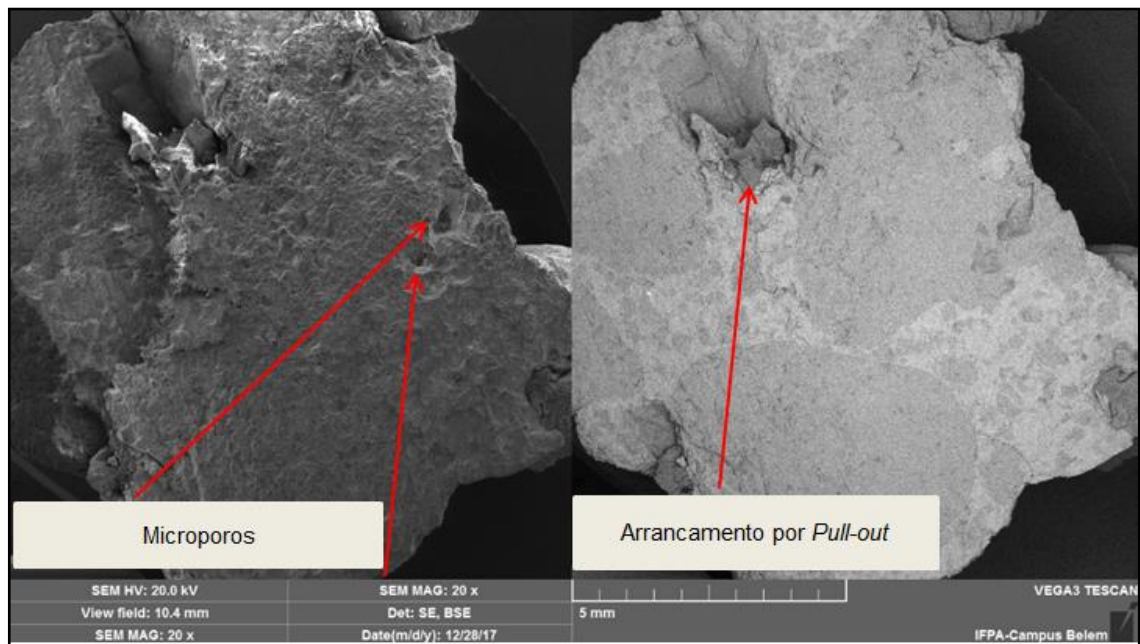
Por fim, a Tabela 18 apresenta os resultados obtidos na espectroscopia de dispersão de energia realizada em uma amostra de CB9 e no próprio resíduo de borracha decorrente do processo de recauchutagem. Esta análise foi feita a fim de verificar se a aderência entre a fibra e a matriz poderia estar atrelada a predominância de alguma substância química. No entanto, foi verificado que os principais componentes presentes na amostra de concreto com borracha são: o silício e cálcio (advindos do cimento). Em relação ao resíduo, observou-se que os componentes majoritários são: o carbono, o oxigênio e o zinco. Isso comprova que, a borracha quando em contato com a pasta cimentícia não sofre reações químicas que alterem sua estrutura, corroborando com a bibliografia sobre o tema, a qual afirma que este é um material inerte, que é modificado apenas, quando submetido a altas temperaturas. Constatou-se dessa forma, que a aderência entre a matriz cimentícia e as fibras de borracha se deram por forma puramente mecânica em decorrência da superfície áspera da borracha, como pode ser verificado na Figura 37. As irregularidades da superfície das fibras são compostas de reentrâncias e tentáculos, o que dá ao material capacidade de se prender a pasta de cimento.

Figura 35. MEV da fratura do compósito com 6% de adição



Fonte: Autor (2018)

Figura 36. MEV da fratura do compósito com 6% de adição – aumento de 20x

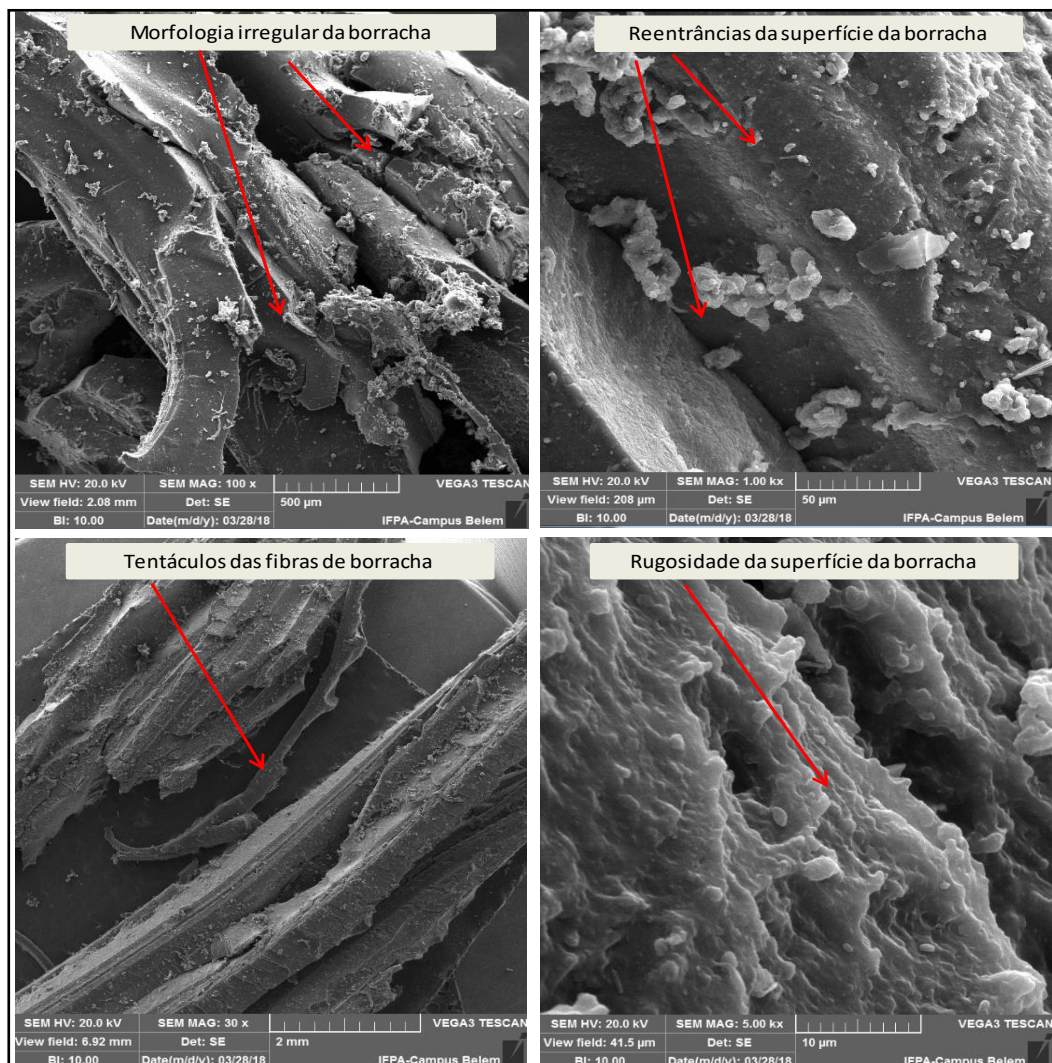


Fonte: Autor (2018)

Tabela 18. Resultados da espectroscopia de dispersão de energia

Concreto com borracha		Borracha do processo de recauchutagem	
Componente	Concentração (%)	Elemento	Concentração (%)
C	2,83	C	30,82
O	4,95	O	1,16
Mg	0,03	Na	0,15
Al	0,17	Al	0,08
Si	3,43	Si	0,11
S	0,2	S	0,86
K	0,04	K	0,04
Ca	4,85	Ca	0,03
Ti	0,06	Fe	0,09
Fe	0,17	Zn	1,69
Zn	0,25	-	-

Fonte: Autor (2018)

Figura 37. Análise da morfologia do resíduo de borracha de recauchutagem de pneu

Fonte: Autor (2018)

4.10 ANÁLISE QUANTITATIVA DO BENEFÍCIO AMBIENTAL GERADO PELO USO DE RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEUS EM CONCRETO

A Tabela 19 apresenta os valores encontrados para a avaliação do benefício ambiental decorrente da inserção de resíduos de pneus para fabricação de concreto. Observa-se que, para a produção de 1m³ de concreto com adição de 6% de borracha, o reaproveitamento de resíduos equivaleria a 26 processos de recauchutagem de pneu de caminhão e ônibus, 78 para os pneus de automóveis de passeio, e 156 para os de moto. Já para o compósito com teor de 9% de adição, esse valor subiria para 39 processos de recauchutagem de pneu de caminhão e ônibus, 117 para os pneus de automóveis de passeio e 233 para os de moto.

Esses resultados permitem verificar que utilização de resíduos de borracha de recauchutagem de pneu contribuiria de forma significativa para a diminuição dos danos causados pela disposição inadequada dos resíduos dos pneumáticos na natureza.

Tabela 19. Análise quantitativa do benefício ambiental gerado pelo uso de borracha de pneu de recauchutagem para produção de concreto

Tipo de Pneu	Quantidade de resíduos gerados no processo de recauchutagem (kg)	Quantidade de borracha utilizada para produção de 1 m ³ de CB6 (kg)	Quantidade de borracha utilizada para produção de 1 m ³ CB9 (kg)	Nº de processos de recauchutagem realizados para confecção de 1m ³ de concreto (unidades)	
				6%	9%
Caminhão e ônibus	1,2			26	39
Automóveis de passeio	0,4	31,1	46,65	78	117
Moto	0,2			156	233

Fonte: Autor (2018)

4.11 ANÁLISE DE CUSTOS

Na Tabela 20 é possível observar o comparativo de preços para produção de 1 m³ de concreto convencional, e para os concretos com adição de 6% e 9% de resíduo de borracha. Verifica-se que a adição da borracha, por possibilitar um maior incremento no volume do concreto, aumenta o seu rendimento promovendo uma redução nos valores de confecção deste compósito. O melhor resultado foi referente ao CB9 que apresentou uma redução de custos da ordem de 4% em relação ao CR.

Tabela 20. Avaliação de custos

	Quantidades de Insumos			Valor dos Insumos	Valor para produção de 1m ³ de Concreto		
	CR	CB6	CB9		CR	CB6	CB9
Cimento (Kg)	444,4	431,1	426,7	R\$ 0,53	R\$ 235,55	R\$ 228,49	R\$ 226,13
Seixo (m ³)	0,5	0,4	0,4	R\$ 59,10	R\$ 27,13	R\$ 26,32	R\$ 26,05
Areia (m ³)	0,2	0,2	0,2	R\$ 45,00	R\$ 8,88	R\$ 8,61	R\$ 8,52
Borracha (Kg)	0,0	31,1	46,65	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
				Total	R\$ 271,56	R\$ 263,42	R\$ 260,70
				Redução de Custos (%)	-	- 3%	- 4%

Fonte: Autor (2018)

Resultados semelhantes foram obtidos por Gomes Filho (2007) que indicou uma redução de até 7,6% no custo do concreto com borracha se comparado com o concreto convencional, demonstrando a sua viabilidade comercial. Além disso, o concreto com borracha apresentou outras vantagens, tais como a redução do peso, o que facilita a manipulação e diminui o desgaste de equipamentos.

5 CONCLUSÃO

Por meio deste trabalho foi possível constatar que o emprego de resíduo de borracha de recauchutagem de pneus para a produção de concreto é uma alternativa viável do ponto de vista técnico, econômico e ambiental, sendo que este compósito pode ser empregado em elementos e peças pré-moldadas, principalmente em placas de pavimentação intertravada de baixo tráfego, por estar adequada às condições estabelecidas pela legislação vigente.

Para os traços analisados, a resistência à compressão axial, diametral e tração na flexão foi reduzida em relação ao concreto de referência. Isto se deve à baixa aderência presente em alguns pontos entre a fibra de borracha e a matriz cimentícia. No entanto, estas reduções podem ser consideradas pequenas levando-se em consideração as literaturas pesquisadas sobre o tema. Ressalte-se, ainda, que todos os três tipos de concreto analisados obtiveram resistências à compressão axial superiores ao que está previsto na NBR 9781 (ABNT, 2013), sendo, portanto, indicados para aplicação de pavimento intertravado com pouca solicitação de carga.

Outro ponto importante a se destacar é que os compósitos com adição de borracha por apresentarem uma diminuição em seus módulos de elasticidade possuem uma maior capacidade de deformabilidade, tornando-se menos frágil que o concreto convencional, fato este que concorre à finalidade prevista para o concreto produzido, já que os pavimentos estão sujeitos a cargas dinâmicas, sendo importante que o material empregado seja capaz de absorver maior quantidade de energia, deformando-se sem comprometer a estrutura da via.

No estado fresco foi observado que a trabalhabilidade dos concretos com adição de borracha foi reduzida em relação ao de referência. Todavia, não foi necessária alteração na relação água/cimento nem a utilização de aditivos, o que poderia encarecer o concreto produzido.

Todas as três composições de concreto analisadas mostraram-se dentro dos parâmetros estabelecidos pela NBR 9781 (ABNT, 2013) no que se refere à absorção, sendo que o compósito com adição de 9% apresentou um resultado mais satisfatório que o concreto tradicional; isto pode estar relacionado também ao processo de adensamento manual empregado nos corpos de prova.

Com relação à massa específica, a porcentagem de adição de borracha influencia diretamente a redução desta grandeza. O traço com 6% de adição mostrou-se o mais leve entre os três. Essa é uma característica importante para fabricação de concretos com peso

reduzido, o que possibilitaria maior facilidade no transporte e aplicação de um pavimento, por exemplo.

Ao comparar os resultados obtidos, identifica-se que o teor ótimo de adição de resíduo é o de 9%, pois apresenta uma redução na resistência à compressão axial de apenas 2,13% em relação ao teor de 6%, sendo que se consegue incorporar uma maior quantidade de resíduo, contribuindo para a logística reversa deste material.

Através da análise quantitativa realizada neste trabalho, constatou-se que o uso de resíduos de borracha de pneus de recauchutagem em concreto é uma prática altamente benéfica à gestão ambiental dos pneumáticos, que contribui de forma significativa para redução desse passivo ambiental.

Também se verificou que o concreto com borracha se torna economicamente viável por apresentar uma redução de custos de fabricação em relação ao concreto tradicional devido ao seu maior rendimento dado pelo grande volume do resíduo incorporado à mistura. Conclui-se dessa forma que, a proposta estabelecida na presente pesquisa teve êxito, uma vez que, conseguiu demonstrar que o material final obtido está dentro dos parâmetros técnicos estabelecidos pelas normas vigentes, além de contribuir de forma significativa para a logística reversa dos pneumáticos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dando continuidade a este estudo sugerisse os seguintes temas:

- Estudo comparativo da dosagem do concreto com resíduo de borracha utilizando o método da ABCP e IPT;
- Análise das propriedades de resistência ao impacto e desgaste por abrasão em placas de concreto com resíduos de borracha;
- Análise do comportamento à Flexão em placas de concreto com borracha;
- Estudo sobre a temperatura de fulgor do concreto com resíduos de borracha;
- Estudo do concreto com adições de borrachas submetidas a um melhoramento químico a base de NaOH ou outras substâncias com características semelhantes.

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: 26 Dez. 2017.

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.

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.reciclarepreco.hpg.ig.com.br/recipneus.htm>>. Acesso em: 20 set. 2017.

ANIP -ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE INDÚSTRIAS DE PNEUMÁTICOS. Disponível em: <www.anip.com.br>. Acesso em: 27 out. 2017.

ARAÚJO, Felipe Costa; SILVA, Rogério José da.. **Pneus inservíveis: análise das leis ambientais vigentes e processos de destinação final adequados**. Porto Alegre: ENGEPE, 2005. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2005_Enegep1004_1123.pdf>. Acesso em: 27 out. 2017.

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.

_____.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 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.

BATAYNEH, M.K.; MARIE, I.; ASI, I. *Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries.* *WasteManage*, 2008; 28:2171-6.

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.

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

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **CONAMA n° 416**. Resolução n° 416, de 30 de setembro de 2009.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **CONAMA n° 258**. Resolução n° 258, de 26 de agosto de 2009.

BRAZIL TIRES, Tudo sobre pneus. Disponível em:
<www.geocities.ws/unicariguatu/CONHECAOSPNEUS.html> Acessado em: 10 dez.2017.

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.

DUKE ENERGY INTERNATIONAL GERAÇÃO PARANAPANEMA/LACTEC. **Desenvolvimento de Metodologia Executiva e Pesquisa de Materiais de Reparos em Estruturas de Concreto (aparentes e submersas) de Barragens**. – MANUAL DE REPAROS. 2001.

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.

FAZZAN, J. V. **Comportamento estrutural de lajes pré-moldadas treliçadas com adição de resíduo de borracha de pneu**. 2011. 176 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

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.

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.

GIACOBBE, S. **Estudo do comportamento físico-mecânico do concreto de cimento Portland com adição de borrachas de pneus.** Tese de Mestrado em Engenharia Civil - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008. p.106.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 5. Ed. São Paulo: Atlas, 1999.

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.

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

KHALOO, A.; DEHESTANI, M.; RAHMATABADI, P. *Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. Waste Management.* v. 28, p. 2472–2482, 2008.

KHATIB, Z.K., BAYOMY, F.M., J. Mat. in Civ. Engrg., 11 (1999).

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.

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.

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.

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.

NAJIM, K.B; HALL, M.R. *A review of the fresh/hardened properties and applications for plain – (PRC) and self-compacting rubberized concrete (SCRC)*. Construction and Building Materials, 2010; 1 (6):83-96.

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

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.

OLIVARES, F. H. *et al. Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete*. Cementand Concrete Research, v.32, p. 1587-1596, 2002.

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.

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

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: 12 jun. 2017.

PELISSER, F.; BERNADIN, A. M. *Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition*, 2011: Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/229363759>>. Acessado em: 12 jun. 2017.

PETRUCCI, E. G. R., **Concreto de cimento Portland**. São Paulo, 1998.

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.

RAFAT, S.; TARUN, R.N. *Properties of concrete containing scrap tire rubber – an overview*. WasteManage. 2004; 24: 563-9.

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: 24 de jun. 2017.

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

REVLOG. **Pesquisa geral no site**. Disponível em: <<http://www.fbk.eur.nl/OZ/REVLOG/>>. Acesso em: 02 nov. 2017.

REVISTA PESQUISA FAPESP, ed., 246, Disponível em: <revistapesquisa.fapesp.br/2016/08/19/reciclagem-de-pneus/> Acesso em: 05 nov. 2017.

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

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.

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

ROSSIGNOLO, J.A. **Concreto leve estrutural**. 2009. 94 p. Texto (Livre-Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

SNELSON, D. G. *et al.*, . *Sustainable construction: composite use of tyres and ash in concrete*. WasteManage, 2009; 29:360-7.

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.

SANTOS, A. C. **Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneus com aplicação em placas pré-moldadas.**

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.

SINDIPNEUS. Disponível em: <www.sindipneus.com.br> Acessado em: 12 dez. 2017.

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

SOUSA, 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.

SOUSA, 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.

SUKONTASUKKUL, P.; CHAIKAEW, C..*Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber.* Constr Build Mater. 2006; 20:450-7.

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, I. B.; AVCULAR, N. (1997). *Collision Behavuuours of Rubberzed Concrete.* Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>, acesso em: 5 de ago. 2017.

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

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.

APÊNDICE A – Gráficos dos ensaios do módulo de elasticidade

