



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias

Shirlei de Souza Britto

**Reciclagem de pneus para utilização na fabricação de concreto estrutural**

Rio de Janeiro

2024

Shirlei de Souza Britto

**Reciclagem de pneus para utilização na fabricação de concreto estrutural**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Alex da Silva Sirqueira

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> MSc. Thais Magdalena de Paula

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CZO

B862 Britto, Shirlei de Souza

Reciclagem de pneus para utilização na fabricação de concreto estrutural / Shirlei de Souza Britto - 2024.  
63 f.

Orientador: Alex da Silva Siqueira  
Coorientadora: Thais Magdalena de Paula

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais.

1. Ciência e Tecnologia de Materiais - Teses. 2. Concreto - Teses. 3. Resíduo de borracha - Teses. 4. Reciclagem – Teses. 5. Propriedades mecânicas – Teses. 6. Resistência à compressão – Teses. I. Siqueira, Alex da Silva. II. Paula, Thais Magdalena de. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias. IV. Título.

CDU 620

Bibliotecária: Joice Soltosky Cunha – CRB 7 5946

Autorizo apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que cite a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Shirlei de Souza Britto

**Reciclagem de pneus para utilização na fabricação de concreto estrutural.**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 24 de maio de 2024.

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> MSc. Thais Magdalena de Paula  
Vesuvius Refratários LTDA.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Alex da Silva Sirqueira (Orientador)  
Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias – UERJ

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Neyda de La Caridad Om Tapames  
Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias – UERJ

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Ketly Pontes Soares  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ

---

Rio de Janeiro

2024

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus afilhados Matheus, Luíza, Ana Luísa e Pedro Henrique como incentivo à educação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por estar sempre ao meu lado em todos os meus projetos, aos meus pais pelo amor e dedicação de uma vida inteira e aos meus orientadores Alex e Thaís por não desistirem de mim.

## RESUMO

BRITTO, Shirlei de Souza. *Reciclagem de pneus para utilização na fabricação de concreto estrutural* 2024. 63 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

O descarte de pneus inservíveis no meio ambiente gera um enorme problema ambiental. O aproveitamento destes resíduos na formulação de concreto tem despertado crescente interesse nas últimas décadas, representando uma abordagem inovadora e sustentável para lidar com este problema mundial, auxiliando inclusive na logística reversa, contribuindo para soluções economicamente viáveis para atender a lei nº 12.305/10 referente à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e à Resolução CONAMA nº 416/09 do IBAMA que dispõe sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos. O objetivo deste estudo é realizar um levantamento bibliográfico a fim de se obter dados com a incorporação de resíduos de borracha na confecção de concreto, de modo a entender como essa modificação no compósito pode modificar suas propriedades mecânicas e verificar se é possível obter resultados satisfatórios com diferentes percentuais e adição ou substituição de materiais, garantindo um desempenho tal que essa alteração não afete os limites de norma. Os experimentos reportados pela literatura mostram dados da variação nas propriedades mais importantes do concreto: resistência à compressão e módulo de elasticidade. As correlações mostraram a importância de se escolher um bom traço para elaboração do concreto, determinar de forma correta e eficiente a relação água cimento e principalmente o percentual adequado de adição/ substituição do resíduo de borracha na massa de agregados miúdos.

Palavras-chave: Concreto, resíduo de borracha, reciclagem, propriedades mecânicas, resistência à compressão.

## ABSTRACT

BRITTO, Shirlei de Souza. *Recycling tires for use in the manufacture of structural concrete* 2024. 63 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The disposal of unusable tires in the environment creates a huge environmental problem. The use of these residues in the formulation of concrete has aroused increasing interest in recent decades, representing an innovative and sustainable approach to dealing with this global problem, including helping with reverse logistics, contributing to economically viable solutions to comply with law n° 12.305/10 regarding National Solid Waste Policy (PNRS) and CONAMA Resolution No. 416/09 of IBAMA, which provides guidelines for integrated management and solid waste management. The objective of this study is to carry out a bibliographical survey in order to obtain data on the incorporation of rubber waste in the manufacture of concrete, in order to understand how this modification in the composite can modify its mechanical properties and verify whether it is possible to obtain satisfactory results with different percentages and addition or replacement of materials, ensuring performance such that this change does not affect the standard limits. The experiments reported in the literature show data of variation in the most important properties of concrete: compressive strength and modulus of elasticity. The correlations showed the importance of choosing a good mix for preparing the concrete, correctly and efficiently determining the water-cement ratio and mainly the appropriate percentage of addition/replacement of rubber residue in the mass of fine aggregates.

Keywords: Concrete, rubber waste, recycling, mechanical properties, compression strength.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Incêndio de pilhas de pneus na Califórnia em setembro 1999 .....	14
Figura 2 –	Campanha contra dengue da Prefeitura de Salvador .....	14
Figura 3 –	Estrutura de concreto deteriorada com o tempo .....	15
Figura 4 –	Estrutura de concreto deteriorada com o tempo .....	16
Figura 5 –	Muro de contenção feito a partir de pneus inservíveis .....	19
Figura 6 –	Estrutura do pneu .....	20
Figura 7 –	Quantidade de pneus novos colocados no mercado de reposição em 2022.....	24
Figura 8 –	Percentual de cumprimento da meta de destinação nacional de pneus inservíveis em 2022 .....	24
Figura 9 –	Pontos de coleta de pneus inservíveis declarados, por estado em 2022 .....	25
Figura 10–	Materiais compósitos para o concreto .....	28
Figura 11–	Agregado graúdo (brita) e agregado miúdo (areia) para fabricação e concreto .....	31
Figura 12–	Fabricação e lançamento do concreto com betoneira .....	32
Figura 13–	Lançamento do concreto bombeado .....	32
Figura 14–	Corpos de provas rompidos após ensaio de resistência à compressão axial .....	33
Figura 15–	Corpos de provas rompidos após ensaio de resistência à compressão axial .....	34
Figura 16–	Ensaio de tração por compressão diametral .....	35
Figura 17–	Ensaio de abatimento de cone .....	37
Figura 18–	Ciclo de vida dos pneumáticos .....	42
Figura 19–	Resíduos de borracha de diferentes granulometrias .....	43
Figura 20–	Imagem estrutural MEV .....	53
Figura 21–	Corpos de prova de compressão/densidade fabricados em molde de borracha de silicone, pós ensaio de compressão.....	54
Figura 22–	Representação gráfica da média entre as réplicas das condições experimentadas na variável resposta resistência a compressão .....	55

Figura 23–	Gráfico resultados do módulo de elasticidade no ensaio de compressão	56
Figura 24–	Ensaio de resistência à compressão axial .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Principais composto químicos do clínquer .....	30
Tabela 2 –	Classificação dos cimentos Portland comercializados no Brasil .....	30
Tabela 3 –	Classe de consistência do concreto .....	38
Tabela 4 –	Parcelas de resistência mecânicas dos concretos em porcentagem .....	41
Tabela 5 -	Relação entre o Módulo de Elasticidade com a Tensão de Ruptura na tração à flexão para os traços T1, T2 e T3 .....	47
Tabela 6 –	Resultados de resistência à compressão e Módulo de Elasticidade dos traços T1 a T8 .....	47
Tabela 7 –	Dosagem do concreto com resíduo de borracha de pneus .....	49
Tabela 8 -	Valores do abatimento do concreto .....	50
Tabela 9	Resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 7 e 28 dias ..	50
Tabela 10	Resistência à compressão dos corpos de prova quadrados em formato de pisos aos 7 e 28 dias .....	51
Tabela 11	Resultados da resistência à tração na flexão aos 28 dias .....	51
Tabela 12	Resultados do ensaio de compressão aos 28 dias .....	53
Tabela 13	Planejamento de experimento e nomenclatura .....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Empresas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Cimento Portland
Fator AC	Fator Água/ Cimento
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
FCK	Resistência Característica do Concreto à Compressão ( <i>Feature Compression Know</i> )
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos

## LISTA DE SÍMBOLOS

L	Litro
ML	Mililitro
M <sup>3</sup> /s	Metro cúbico por segundo
mg	Miligramma
Mpa	Mega pascal
Mm	Milímetro
M <sup>2</sup>	Metro cuadrado
M <sup>3</sup>	Metro cúbico
μm	Mícron

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1	<b>OBJETIVOS</b> .....	17
1.1	<b>Geral</b> .....	17
1.2	<b>Específicos</b> .....	17
2	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	18
2.1	<b>O pneu</b> .....	19
2.2	<b>Reciclagem de pneus</b> .....	22
2.2.1	<u>Resolução CONAMA nº 416 de 30/09/2009</u> .....	22
2.2.2	<u>Logística Reversa – Economia Circular</u> .....	25
2.2.3	<u>Política nacional de resíduos sólidos (PNRS)</u> .....	27
2.3	<b>O concreto</b> .....	28
2.3.1	<u>Composição</u> .....	28
2.3.2	<u>Propriedades e características do concreto</u> .....	32
2.3.3	<u>Dosagem</u> .....	38
2.3.4	<u>Controle Tecnológico</u> .....	39
2.4	<b>Adição de resíduos ao concreto e durabilidade</b> .....	41
3	<b>METODOLOGIA DA PESQUISA</b> .....	44
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	46
	<b>CONCLUSÃO</b> .....	58
	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	58
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	59

## INTRODUÇÃO

O crescimento urbano tem sido acompanhado pelo aumento na geração de resíduos sólidos, principalmente com materiais poliméricos, impactando no meio ambiente. Por isso, ações de investimentos em pesquisa de inovações tecnológicas são fundamentais para transformar esses resíduos em novos produtos. Este procedimento reduz o impacto ambiental causado pelo descarte inadequado, e aumenta a circularidade de um material nobre como os polímeros, Gouveia (2012).

Strauch e Albuquerque (2008) apontam que as origens do problema dos resíduos estão intrinsecamente ligadas a três fatores: o desenvolvimento econômico desacerbado, os atuais padrões de consumo e a produção sem levar em conta os impactos ambientais.

Dentre os principais poluentes poliméricos, os pneus são os mais nocivos, pois podem servir como criadores de vetor, poluentes do lençol freático etc. Além disso, com a crescente urbanização e industrialização, o descarte inadequado de pneus usados tornou-se um desafio ambiental global, resultando em poluição do solo, da água e do ar.

No contexto brasileiro, o país se destaca como o 5º maior produtor mundial de pneus para caminhões e ônibus e o 7º para automóveis. Mesmo diante da pandemia da COVID-19 em 2020, a indústria registrou a venda de mais de 53,8 milhões de pneus, entre reposição e equipamentos originais. É notável o esforço do setor em atender suas responsabilidades ambientais, destinando de forma adequada mais de 471 mil toneladas de pneus inservíveis em 2019. Desde 1999, o setor tem se destacado internacionalmente pela eficiência de sua logística reversa, proporcionando o crescimento sustentável tanto para a indústria quanto para o país. (Fonte: ANIP, 2022)

Segundo Rodrigues (2015), a preservação ambiental é um dos assuntos mais debatidos pela sociedade contemporânea. Os impactos causados pelos pneus quando descartados incorretamente são catastróficos, um pneu descartado incorretamente na natureza leva em torno de 600 anos para se decompor. No Brasil mais de 40 milhões de pneus são produzidos a cada ano e quase a metade acaba sendo descartada sem controle. (VASCONCELOS & AKASAKI, 2010).

O acúmulo de pneus inservíveis armazenados em pilhas a céu aberto tem um potencial para causar grandes incêndios, e uma vez que uma grande pilha pega fogo, é muito difícil apagar. Além disso, esse material descartado em terrenos baldios, devido ao seu formato, tende

a reter água de chuva criando um ambiente propício a proliferação de vetores, como o mosquito “*Aedes Aegypti*” (SILVA, 2014).

Figura 1 – Incêndio de pilhas de pneus na Califórnia em setembro 1999



Fonte: SILVA 2014.

Figura 2 – Campanha contra dengue da Prefeitura de Salvador



Fonte: PREFEITURA DE SALVADOR, 2020.

Paralelo a isso, temos o concreto como o material mais utilizado na construção civil. Esta por sua vez tem grande representatividade na economia do nosso país. Ele é obtido através de uma mistura de cimento, agregados graúdos e miúdos e água. Em algumas situações são adicionados outros materiais para melhorar suas propriedades como aumentar sua trabalhabilidade e resistência ou retardar a velocidade de suas reações químicas. As diversas características que o concreto endurecido deve apresentar para que possa ser utilizado dependem fundamentalmente do planejamento e dos cuidados na sua execução.

Uma estrutura de concreto deve ser projetada de tal forma que, sob condições ambientais esperadas, ela mantenha sua segurança, funcionalidade e aparência aceitável durante um período, implícito ou explícito, sem elevado custos de manutenção. No entanto, as estruturas de concreto possuem uma vida útil, pois se deterioram com o passar dos anos, devido a problemas de execução e uso indevido de materiais. A necessidade de estudos para aplicabilidade de matérias residuais para fabricação do concreto é de grande importância tanto para a economia quanto para o potencial de redução de impactos ao meio ambiente.

Figura 3 – Estrutura de concreto deteriorada com o tempo



Fonte: A autora, 2019.

Figura 4 – Estrutura de concreto deteriorada com o tempo



Fonte: A autora, 2019.

O resíduo de borracha de pneus vem sendo estudado a fim de avaliar sua utilização como agregado no concreto. A reutilização dos resíduos de borracha na construção civil é uma das várias formas de aproveitar o seu potencial, na melhoria de algumas propriedades do concreto e evitar o descarte inadequado destes resíduos auxiliando na questão ambiental e podendo reduzir os custos de produção. (SILVA, 2014).

Assim, a incorporação desses resíduos na produção de concreto oferece solução promissora, ao mesmo tempo em que contribui para reduzir a demanda por materiais tradicionais, como agregados naturais, e mitigar os impactos ambientais associados à disposição inadequada de resíduos.

Neste contexto, esta pesquisa trata do estudo da reciclagem de resíduos de pneus inservíveis na produção de concreto estrutural, devido à grande necessidade de reciclagem de resíduos sólidos não reaproveitados e descartados diretamente em aterros sanitários que vem prejudicando cada vez mais o meio ambiente. Somado a isso, temos a necessidade da criação de um compósito barato e que se comprovada a viabilidade de sua aplicação, poderá diminuir consideravelmente os custos de produção do concreto para fins estruturais, que justificam o porquê do estudo e importância desse tema.

## **1. OBJETIVO**

### **1.1 Geral**

Este estudo tem como objetivo principal demonstrar, por meio de pesquisa bibliográfica, como a inovação através da reutilização de resíduos de pneus pode contribuir não apenas para a economia, mas também para a reciclagem desses materiais, promovendo um descarte adequado e o reaproveitamento dos pneus descartados, com ênfase nos benefícios ambientais.

### **1.2 Específico**

Como objetivos específicos temos:

- a) Comparar as características e propriedades do concreto convencional com o concreto contendo resíduos de pneus;
- b) Evidenciar os benefícios ambientais associados ao uso de concreto com incorporação de resíduos de pneus;
- c) Evidenciar os benefícios ambientais associados ao uso de concreto com incorporação de resíduos de pneus;
- d) Apresentar algumas das técnicas utilizadas na incorporação de resíduos de pneus na formulação de concreto.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os pneus descartados geram enormes impactos ao meio ambiente quando são inadequadamente descartados. Esses materiais são as maiores ameaça ao meio ambiente, devido a problemas sanitários, como o aumento da proliferação de agentes nocivos, roedores e mosquitos, que podem transmitir doenças. Certos resíduos, quando incinerados, são difíceis de destruir sem causar danos ao meio ambiente, gerando poluição ambiental por hidrocarbonetos e outros compostos perigosos.

Estima-se que cerca de 1,5 bilhão de pneus sejam descartados no mundo anualmente. Por ser um material considerado difícil de ser absorvido pelo ambiente, diversos pesquisadores têm buscado alternativas para sua reciclagem, a fim de mitigar seus impactos (MOHAJERANI et al., 2020).

A dificuldade em descartar o pneu se dá por sua constituição, pois seus constituintes apresentam materiais com elevadíssimo tempo de decomposição. Os pneus automotivos constituem elementos fundamentais para o desempenho dinâmico e a segurança veicular. São responsáveis por suportar integralmente o peso do veículo (carrinho de mão, bicicletas, carros veiculares, carros de corrida, caminhões urbanos, caminhões de mineradoras, aviões e outros), sendo o único ponto de contato com o solo. Portanto, desempenham um papel crucial no comportamento do automóvel durante acelerações, frenagens e mudanças de direção.

A borracha, tanto de origem vegetal, obtida da seringueira, quanto sintética, derivada do petróleo, é o elemento principal na fabricação de pneus. No entanto, suas características variam conforme a fonte. A borracha natural, predominantemente utilizada em pneus de caminhões, é conhecida por sua maior resistência à tensão e baixa geração de calor. Por outro lado, a borracha sintética, preferida na produção de pneus de carros de passeio, destaca-se pela resistência ao desgaste e capacidade de tração.

Além da borracha, diversos outros elementos são incorporados à composição dos pneus. Entre eles estão o enxofre, catalisadores, óleos, agentes antienvelhecimento e o negro de fumo, um pó escuro obtido através da queima de óleos em fornos especiais, que desempenha função de reforço.

Um componente adicional utilizado é a sílica, que tem ganhado destaque crescente na produção de pneus, especialmente nos modelos conhecidos como “pneus verdes”. Esses pneus são projetados para proporcionar menor resistência à rolagem, contribuindo assim para uma maior economia de combustível.

A estimativa do impacto negativo dessas práticas leva a comunidade científica a considerar formas alternativas de reutilização desses materiais. Assim, reciclar a borracha de pneus usados na forma de agregados como material de construção suplementar é uma forma que tem sido estudada e reproduzida em diferentes cenários (SIDDIKA et al., 2019). Nesse sentido, uma das linhas de pesquisa é o uso de resíduos de borracha de pneus como agregado para construção civil, pois possui baixa densidade, apresentando características ideais para uso em compostos cimentícios, resultando em menor massa específica quando comparado aos compostos cimentícios tradicionais. Um exemplo de compósitos de cimento leve é o concreto leve, que possui uma massa específica variando de  $1120 \text{ kg/m}^3$  a  $1920 \text{ kg/m}^3$  (ACI 213R-03/2003); o concreto convencional, por outro lado, tem uma massa específica entre  $2.000 \text{ kg/m}^3$ .

Figura 5 – Muro de contenção feito a partir de pneus inservíveis



Fonte: ÁVILA, 2017.

## 2.1 O Pneu

O pneu é um dos componentes mais importantes de um veículo automotor. Ele suporta o peso da estrutura, da carga transportada e faz o contato com o solo. Ele também transforma a força do motor em tração e é responsável pela estabilidade do veículo e pela eficiência da frenagem.

A estrutura de um pneu não é algo simples uma vez que ele é formado por vários materiais com propriedades bem diferentes entre si, sendo a borracha seu principal componente.

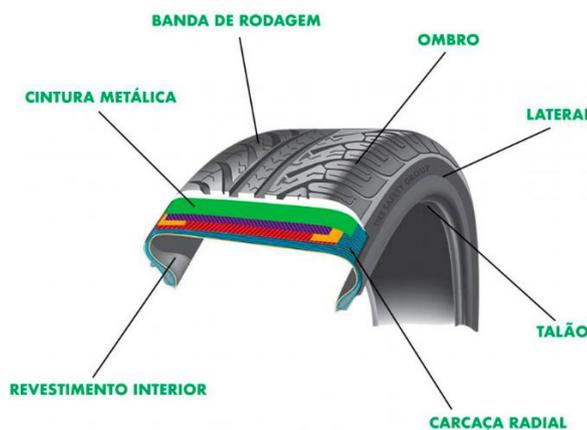
De modo geral, podemos afirmar que o pneu é um material polímero do tipo elastômero que foi submetido a vários processos termoquímicos para adquirir a resistência e durabilidade requerida para a sua aplicação. (ÁVILA, 2017).

Para reciclar um pneu é importante saber como e de que ele é feito. E ao contrário do senso comum, o pneu não é feito apenas de uma única camada de borracha.

De acordo com a Associação Brasileira de Reforma de Pneus (ABR) este material é composto por diversas partes como mostra a Figura 6.

A banda de rodagem recebe o desenho específico para o tipo de solo que o pneu é indicado. As cinturas metálicas e lonas metálicas são partes internas do pneu, que ajudam na sustentação. O revestimento de goma interno é constituído por uma goma impermeável para que o ar não seja liberado. O talão recebe um aro interno, que serve como apoio na montagem da roda.

Figura 6 – Estrutura do pneu



Fonte: <http://abr.org.br/noticia/partes-do-pneu>.

A constituição de um pneu é, basicamente, uma mistura de borracha natural e de elastômeros sintéticos (polímeros com propriedades físicas semelhantes às da borracha natural). A adição de negro de carbono confere à borracha propriedades de resistência mecânica, durabilidade e desempenho. (RODRIGUES, 2010)

Após a mistura ser trabalhada e ganhar as formas necessárias através dos processos de calandragem e extrusão, os constituintes do pneu são empilhados em sequência e o pneu ganha

forma em um molde. É utilizado o enxofre, compostos de zinco como aceleradores e outros compostos ativadores e antioxidantes. (RODRIGUES, 2010)

Durante a etapa de desenvolvimento de uma formulação elastomérica, a borracha é submetida a uma temperatura, passando por mudanças físicas e químicas que levam à alteração de suas propriedades. Essas alterações se devem a fatores como: tempo e temperatura de vulcanização, método de vulcanização, tipo de elastômero e presença de aditivos. Os agentes de vulcanização mais comuns na indústria são enxofre e peróxido. (OLIVEIRA et al., 2016).

A vulcanização dos pneus é necessária para transformar as propriedades dos elastômeros que compõem este produto. Esta etapa da fabricação transforma o comportamento plástico, comum nos polímeros, em comportamento elástico, possibilitando as aplicações mecânicas. (OLIVEIRA et al., 2016).

Este processo foi descoberto por Charles Goodyear em 1839, que num descuido, deixou cair enxofre em uma amostra de borracha aquecida. (RODRIGUES et al., 2015).

Como formas de reutilização das carcaças dos pneus para veículos de diversos portes, chamada pelo CONAMA de pneus reformados, têm-se a recauchutagem, a remoldagem e a recapagem. No processo de recauchutagem o pneu não pode apresentar cortes ou deformações e sua banda de rodagem tem que apresentar saliências que permitam a aderência do pneu ao solo, podendo prolongar a vida útil do pneu em até 40% e economizar 80% dos recursos utilizados para fabricação de um pneu novo. Já na remoldagem são utilizados pneus importados, devido a uma melhor conservação da carcaça, é o chamado “pneu novo de novo”, sem nenhum tipo de emenda, onde toda banda de rodagem, os ombros e a superfície dos flancos é substituída, gerando uma economia de 20 litros de petróleo se comparado a um pneu novo de automóvel diferentemente da recapagem, onde apenas a banda de rodagem é substituída. Todos esses processos de reutilização dos pneus tem um custo alto devido a necessidade de trituração.

No entanto quando o pneu apresenta danos irreparáveis em sua estrutura que impedem de passar pelo processo de reforma tem-se o pneu inservível que precisa ter a destinação adequada.

Destinação adequada ocorre quando são realizadas técnicas em que os pneus são descaracterizados de sua forma inicial, e que seus elementos constituintes são reaproveitados, reciclados ou processados por outra(s) técnica(s) admitida (s) pelos órgãos ambientais competentes, observando a legislação vigente e normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, e a minimizar os impactos ambientais adversos. (IBAMA, 2023).

## 2.2 Reciclagem de pneus

O aumento crescente da frota de automóveis no Brasil trás várias preocupações e uma delas é o que fazer com os pneus inservíveis após sua utilização.

O descarte indevido desses materiais (que levam cerca de 600 anos para se decompor na natureza) gera diversos riscos à saúde pública, incluindo a proliferação de mosquitos transmissores de doenças tais como a febre amarela, a malária e a dengue. (RODRIGUES et al., 2015)

A fim de diminuir parte desse problema ambiental, foi iniciado um estudo na década de 60 nos Estados Unidos com a ideia de adicionar borracha ao asfalto. Porém sem maiores sucessos devido ao alto custo de produção.

Segundo Rodrigues 2015, esse estudo foi retomado na década de 90 no Brasil e com o uso de novas tecnologias foi possível baratear o processo de reciclagem dos pneus tornando a produção de asfalto borracha viável economicamente, utilizando-se cerca de 20% de borracha em sua composição, tornando-a cerca de cinco vezes e meia mais resistente e duradouro que o asfalto convencional, que utiliza ligante comum em sua composição. Estudos mostram que a cada quilômetro de asfalto borracha utiliza cerca de 1.000 pneus inservíveis em sua fabricação.

A partir de então o tema tem sido pesquisado a fim de diminuir os custos cada vez mais e resolver tanto o problema de descarte quanto o de manutenção e recuperação de estradas no Brasil.

No Brasil temos várias normas que abordam a destinação adequada para os pneus inservíveis, onde podemos destacar a resolução 416 de 30 de setembro de 2009 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências e a Lei nº 12.305/10, Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que dispõe sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis.

### 2.2.1 Resolução CONAMA nº 416 de 30/09/2009

Esta resolução impôs às fábricas de pneus e às importadoras metas de retirada de pneus do meio ambiente.

Desta resolução é importante mencionar os seguintes artigos:

Art. 1º Os fabricantes e os importadores de pneus novos, com peso unitário superior a 2,0 kg (dois quilos), ficam obrigados a coletar e dar destinação adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção definida nesta Resolução.

Art. 3º A partir da entrada em vigor desta resolução, para cada pneu novo comercializado para o mercado de reposição, as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada a um pneu inservível.

Art. 5º Os fabricantes e importadores de pneus novos deverão declarar ao IBAMA, numa periodicidade máxima de 01 (um) ano, por meio do CTF, a destinação adequada dos pneus inservíveis estabelecida no art. 3º desta Resolução.

Art. 15º É vedada a disposição final de pneus no meio ambiente, tais como o abandono ou lançamento em corpos de água, terrenos baldios ou alagadiços, a disposição em aterros sanitários e a queima a céu aberto. (CONAMA, 2009).

O Ibama (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), por meio da Coordenação de Controle de Resíduos e Emissões, vinculada à Coordenação-Geral de Gestão da Qualidade Ambiental da Diretoria de Qualidade Ambiental, é o responsável pelo controle da implementação desta resolução e para isso, publicou em mar/2010 a Normativa 01 (depois aprimorada pela Normativa 09 de jul/2021), que instituiu a elaboração anual do “Relatório de Pneumáticos: Resolução CONAMA nº 416/2009” com os dados e informações fornecidas pelos fabricantes e importadores de pneus novos, bem como pelas empresas destinadoras de pneumáticos inservíveis, conforme Art 5 da Resolução 416/09. (IBAMA, 2023)

De acordo com o relatório do IBAMA de 2023 foram colocados no mercado de reposição de pneu em 2022, aproximadamente 1 milhões de toneladas de pneus, onde 63,06% por fabricantes e 36,94% por importadores. Com esse número e mais algumas outras variáveis foi calculada a meta de destinação Nacional, mostrada na linha 1 da figura 7. Nesta figura também foram apresentados os dados do saldo de destinação Nacional na linha 2. Na figura 8 foi apresentado o percentual de cumprimento da meta.

Figura 7 – Quantidade de pneus novos colocados no mercado de reposição em 2022

<b>Meta de Destinação Nacional</b>	712.057,42	toneladas
<b>Saldo de Destinação Nacional</b>	691.091,45	toneladas

Fonte: IBAMA, 2023.

Figura 8 – Percentual de cumprimento da meta de destinação nacional de pneus inservíveis em 2022

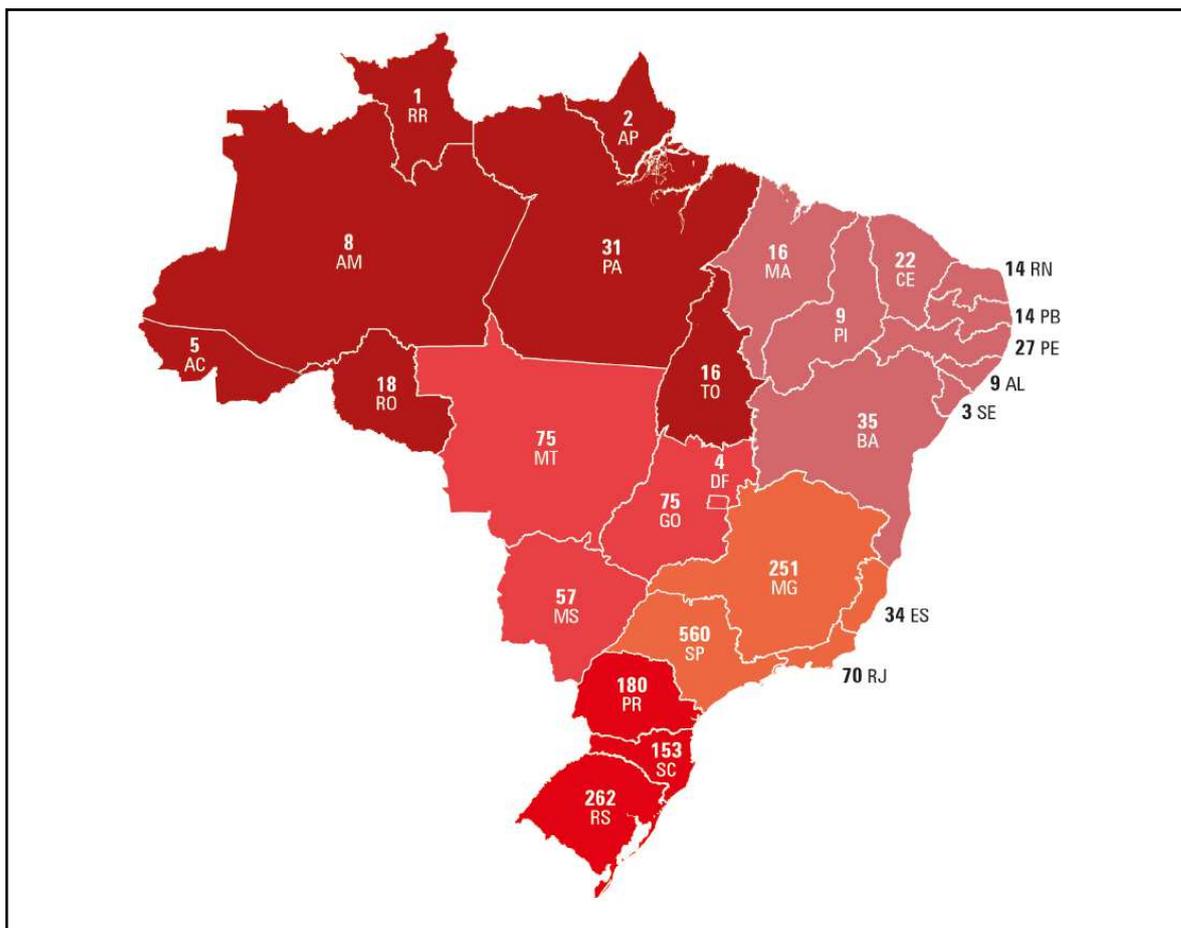


Fonte: IBAMA, 2023.

O relatório do IBAMA de 2023, os fabricantes de pneus novos conseguiram 99,98% da meta de destinação estabelecida para o ano de 2022, enquanto os importadores tiveram um número abaixo, 91,50 % de sua meta estipulada.

Para essa destinação, foram cadastrados em 2022, 1.951 sendo 306 localizados em municípios com população residente acima de 100 mil habitantes, restando 19 municípios, com esta característica, sem nenhum ponto de coleta declarado. Na figura 9 são mostradas as quantidades de pontos de coleta por estado.

Figura 9 – Pontos de coleta de pneus inservíveis declarados, por estado em 2022



Fonte: IBAMA, 2023.

No geral, o cumprimento da meta ficou em 97,06%, bem maior que os 81,08% do ano de 2021, porém menor do que os 98,52% do ano de 2020.

O controle e a apresentação do relatório feito pelo IBAMA, tem viabilizado a coleta e a restituição dos pneumáticos usados e inservíveis ao setor empresarial, tanto para reaproveitamento em seu ciclo produtivo, quanto para outras destinações finais ambientalmente adequadas, contribuindo para um bom gerenciamento da logística reversa.

### 2.2.2 Logística Reversa – Economia Circular

Também conhecida como *Closed Loop*, a Economia Circular tem como objetivo o aproveitamento de 100% de toda matéria prima e resíduos de produção, além de prolongar a vida útil dos produtos, criando um ciclo fechado na sua fabricação, sendo o oposto do modelo linear praticado atualmente (extração de matérias-primas, produção, uso e descarte) através de

subprocessos como a logística reversa, a reciclagem, a remanufatura e o *Ecodesign*. (NERY et al., 2017).

A logística reversa de pneus não reaproveitados (pneumáticos inservíveis) fica a cargo da Reciclanip, que é a representante dos fabricantes de pneus do país.

Segundo a Reciclanip, temos como principais destinos dos pneus inservíveis no Brasil: a laminação, o asfalto borracha, artefatos de borracha e coprocessamento.

A logística reversa foi um dos instrumentos estabelecidos pela PNRS (Política nacional de resíduos sólidos) para implementar a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, de modo a viabilizar o reaproveitamento, principalmente a reciclagem (dando origem a novos produtos ou insumos), dos resíduos sólidos gerados pelas indústrias, diminuindo a quantidade de materiais levados a aterros ou destinados a locais impróprios.

Diferentemente do modelo atual da economia linear cujo conceito é fabricar-usar-dispor, a economia circular é regenerativa e restaurativa, onde os produtos e materiais que o compõe acabam criando uma economia mais robusta, uma vez que são mais valorizados, resultando num equilíbrio entre os impactos ambientais e a vantagem financeira em sua produção, que deve manter a mesma qualidade e potencial econômico, com o objetivo de zero resíduo ou impacto ambiental criando um *closed loop*. (NERY et al., 2017).

Existe ainda o conceito de Ecodesign, cuja ideia é que seja feito um estudo adequado, ainda na fase de projeto, para que gerem menor impacto ambiental, evitando o uso de recursos naturais virgens, focando no reaproveitamento e reciclagem de resíduos, chamados “secundários”. Assim, a Economia Circular tem o objetivo principal de projetar produtos que possam reutilizar os materiais repetidas vezes de maneira que mantém seu valor, diminuindo os padrões de consumo e/ ou consumir produtos melhores.

Projetistas dizem que 80% dos fatores determinantes dos impactos ambientais de ciclo de vida de um produto são definidos na sua projeção, logo, os resíduos são falhas de projetos. Esse é um dos pontos chaves nas discussões para implantação da Economia Circular.

O Ecodesign ou Eco concepção tende a minimizar o impacto ambiental, reduzindo custos de produção e dando uma vantagem competitiva a empresa num tempo em que, cada vez mais, o consumidor tem dado valor ao desenvolvimento sustentável. Os resíduos a serem gerados já devem ser analisados na fase de projeto e desenvolvimento do produto. Onde devem ser escolhidos materiais adequados ao descarte com menos impacto, visando o uso consciente dos recursos naturais, cada vez mais escassos. (NERY et al., 2017).

Outro conceito dentro da Economia Circular é a Logística Reversa que é uma nova área da logística empresarial onde existe a preocupação dos aspectos logísticos quanto ao retorno

dos materiais ao ciclo reprodutivo de modo a criar as matérias-primas secundárias que voltarão ao processo produtivo. (NERY et al., 2017).

### 2.2.3 Política nacional de resíduos sólidos (PNRS)

A Lei Federal 12.305/10 - referente à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), fala que geradores de resíduos sólidos devem produzir ações relacionadas à gestão integrada ou ao gerenciamento de resíduos sólidos e a eles estão inclusos os instrumentos econômicos aplicáveis, obrigando as indústrias a terem uma logística reversa além de fornecer ao consumidor final maneiras de destinares suas embalagens e produtos consumidos de forma correta.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotadas pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos.

A Política Nacional do Meio Ambiente articula-se com a Política Nacional de Educação Ambiental, com a Política Federal de Saneamento Básico e com a Lei no 11.107, de 6 de abril de 2005, que dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências.

Neste ponto, a lei 12305/10 discorre sobre os princípios e objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos onde podemos destacar:

**Princípios:** A prevenção e a precaução; o desenvolvimento sustentável; a cooperação entre as diferentes esferas do poder público, o setor empresarial e demais segmentos da sociedade; o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania, dentre outro.

**Objetivos:** proteção da saúde pública e da qualidade ambiental; não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos; incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados, dentre outros.

Ainda neste título a lei fala sobre os instrumentos da PNRS, onde vale a pena destacar a coleta seletiva, os sistemas de logística reversa e outras ferramentas relacionadas à

implementação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a pesquisa científica e tecnológica.

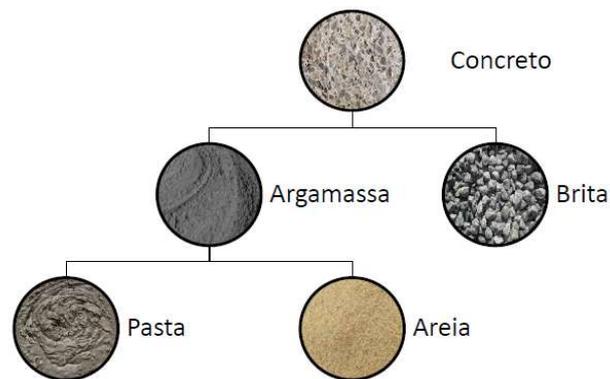
## 2.3 O concreto

O concreto consiste em um material compósito de alta resistência a compressão e baixa resistência a tração, com características típicas de materiais cerâmicos. Sua composição básica apresenta uma matriz cimentícia, formado por cimento e água, que envolve os agregados graúdos e miúdos. (AMARAL JR, 2016).

A variável fundamental de controle das características do concreto é a resistência à compressão, determinada pelo ensaio de compressão simples.

As vantagens desse material é que ele se adapta a todos os locais e circunstâncias, e suas propriedades como versatilidade, durabilidade e desempenho, proporcionam vida útil adequada às construções a um custo competitivo com os outros materiais estruturais. (SILVA 2014).

Figura 10 – Materiais compósitos para o concreto



Fonte: GIDRÃO, 2015.

### 2.3.1 Composição

Conforme dito anteriormente, o concreto é um compósito formado por cimento, água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (pedra ou brita), que também pode ter adições de

outros materiais como cinza volante, pozolanas, sílica ativa e aditivos químicos para mudança de suas propriedades e características a fim de atender uma necessidade específica.

Segundo Amaral Junior (2016), diversos são os materiais que podem ser incorporados ao concreto como agregados, no entanto, esses materiais precisam ser duráveis, não reagirem com os outros componentes do concreto e principalmente não afetar suas propriedades. Em sua grande maioria, os agregados são materiais mais baratos que o cimento e quanto maior porcentagem no compósito menor será o custo final do produto, cuja densidade normal (concreto convencional) varia entre  $2,0 \text{ g/cm}^3$  e  $2,8 \text{ g/cm}^3$ .

O cimento *Portland* foi desenvolvido pelo inglês Joseph Aspdin em 1824, quando calcinou pedras calcárias juntamente com argila e posteriormente transformou o produto gerado em um pó fino, percebendo então que essa mistura após secar tornava-se tão dura quanto as pedras usadas na construção daquela época, chamando o material desenvolvido de cimento Portland por se assemelhar as propriedades das rochas das ilhas britânicas de Portland. Essa invenção mudou as características e metodologias de construção do mundo fazendo então se desenvolver a sociedade moderna como vemos hoje. (ÁVILA, 2017)

A propriedade mais conhecida e importante dos compósitos preparados com o cimento Portland é sua resistência a compressão, somando-se a isso, fatores como a facilidade de uso, possibilidade de moldagem em diferentes formas, a boa interação dos compósitos com outros materiais e a durabilidade, garantem ao cimento a sua larga utilização no mercado da construção civil, sendo o concreto o método construtivo mais utilizado no Brasil. (SILVA, 2019).

Silva (2019) destaca que, quanto mais fino o cimento for, mais reativo ele será, conferindo maior resistência e durabilidade ao compósito nas primeiras idades, no entanto devido a maior superfície específica, necessita de mais água para mistura, diminuindo sua resistência final.

O cimento Portland utilizado hoje é uma mistura de materiais calcários e argilosos, podendo também conter sílica, alumina e óxido de ferro em sua composição, sendo necessário queimá-los em uma determinada temperatura a fim de obter a calcinação e reação entre eles de modo a obter o chamado clínquer. Estes compostos após a queima trazem a característica de ligante hidráulico que é o fator chave para garantir a resistência mecânica do material após sua hidratação. (AVILA, 2017)

Tabela 1 – Principais composto químicos do clínquer

Compostos químicos	% em peso
Silicato Tricálcico $(CaO)_3SiO_2$	45-75%
Silicato Dicálcico $(CaO)_2SiO_2$	7-35%
Aluminato Tricálcico $(CaO)_3Al_2O_3$	0-13%
Ferroaluminato Tetracálcico $(CaO)_4Al_2O_3Fe_2O_3$	0-18%

Fonte: ÁVILA, 2017.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland, a composição do cimento é composta basicamente por clínquer e gesso, porém em função do tipo outros materiais podem ser adicionados como escória granulada de alto forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos. A proporção destes materiais deve seguir as normas NBR5732 (2018) e NBR11578 (2018).

Existem muitos tipos de cimentos para diversas utilidades. Eles se distinguem de acordo com a adição de diferentes materiais ao clínquer, conferindo propriedades mecânicas e químicas variadas como mostrado na tabela 2.

Tabela 2 – Classificação dos cimentos Portland comercializados no Brasil

Nome técnico	Sigla
Cimento Portland comum	CP I
Cimento Portland comum com adição	CP I-S
Cimento Portland composto com escória	CP II-E
Cimento Portland composto com pozolana	CP II-Z
Cimento Portland composto com fíler	CP II-F
Cimento Portland de alto-forno	CP III
Cimento Portland pozolânico	CP IV
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V
Cimento Portland resistente a sulfatos	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS
Cimento Portland de baixo calor de hidratação	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo BC
Cimento Portland branco estrutural	CPB
Cimento Portland branco	CPB*(não apresenta indicação referente à classe)
Cimento Portland para poços petrolíferos	CPP

Fonte: ÁVILA, 2017.

Na composição do concreto existe outros componentes igualmente importantes, os agregados. Segundo ÁVILA, 2017, o agregado é um material particulado, sem coesão, cuja atividade química é considerada inerte e constituído de partículas de diversos tamanhos e sem forma definida. Como exemplo tem-se areia, brita, pedregulho, escória. Eles são classificados entre graúdos e miúdos de acordo com sua granulometria, ou seja, o tamanho de suas partículas,

que tem influência direta na compactidade e resistência aos esforços mecânicos ao qual o concreto será submetido.

De acordo com a NBR 7211 (2009) os agregados ditos miúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75mm e ficam retidos na peneira de malha de 150  $\mu\text{m}$ . O intervalo entre as peneiras 4,75mm e 75mm definem os agregados graúdos.

Como a partícula de agregados geralmente é mais resistente que a pasta de cimento hidratada, sua influência não é levada em consideração para concretos convencionais, a não ser que sejam alterados por outros tipos de agregado, como no caso da borracha, objeto deste trabalho.

Figura 11 – Agregado graúdo (brita) e agregado miúdo (areia) para fabricação e concreto



Legenda: (a) – agregados graúdos (brita); (b) – agregados miúdos (areia).  
Fonte: A autora, 2022.

Figura 12 – Fabricação e lançamento do concreto com betoneira



Legenda: (a) – colocação de material na betoneira para fabricação; (b) – lançamento de concreto.

Fonte: A autora, 2022.

Figura 13 – Lançamento do concreto bombeado



Legenda: (a) – colocação de material na betoneira para fabricação; (b) – lançamento de concreto.

Fonte: A autora, 2021.

### 2.3.2 Propriedades e características do concreto

As principais propriedades mecânicas do concreto são a resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade, que para o controle de qualidade a fim de atender às especificações para as quais ele foi concebido devem ser validadas através de ensaios a serem realizados em condições específicas. (SANTOS E GODINHO, 2017)

Segundo Santos (2017), por ser uma das propriedades mais importantes do concreto, o ensaio de resistência a compressão axial é um dos mais realizados nos canteiros de obra. De fácil execução e baixo custo esse ensaio consiste no rompimento de corpos de prova (coletados durante a concretagem) de 10 x 20cm através de uma prensa. Uma força é aplicada axialmente até a ruptura do objeto, medindo-se então a força a qual ele resiste. O ensaio deve ser realizado conforme NBR 5738:2015.

As figuras 14 e 15 abaixo mostram os corpos de prova e a prensa utilizada para realização destes ensaios.

O cálculo da Resistência à Compressão Axial é definido pela equação:

$$f_c = 4.F/\pi.D^2 \quad (1)$$

Onde:

$f_c$  = Resistência à Compressão (MPa);

F = Força máxima alcançada (N);

D = Diâmetro do corpo-de-prova (mm).

Figura 14 – Corpos de provas rompidos após ensaio de resistência à compressão axial



Legenda: (a) e (b) – detalhe dos pontos de rompimento dos corpos de prova.

Fonte: BERNARDO et al, 2016.

Figura 15 – Prensa servo-hidráulica para ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: SANTOS et al, 2017.

Segundo Amaral Junior (2016), o concreto não tem maiores resistências à tração e é considerado frágil nesse quesito (daí a necessidade de se usar armadura quando necessária uma alta resistência a tração da peça). Ensaio de tração direta não são confiáveis para medir a resistência à tração do concreto sendo utilizados então ensaios de compressão para se determinar a tração. É comum durante o projeto e em casos onde a precisão da resistência à tração não ser tão exigida sendo usado então o valor de 10% da resistência à compressão.

Santos (2017) também relata que para o ensaio de resistência à tração, o corpo-de-prova é submetido a cargas de compressão ao longo de duas linhas axiais que são diametralmente opostas. O ensaio deve ser realizado conforme NBR 7222:2011. O cálculo da Resistência à Tração Axial é definido pela equação abaixo:

$$f_{t,d} = 2.F / \pi.D.L \quad (2)$$

Onde:

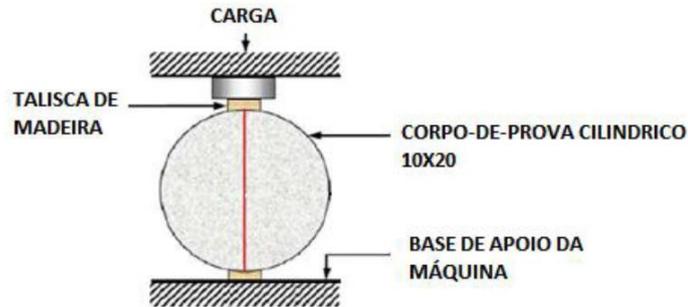
$f_{t,d}$  = Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa);

F = Carga máxima obtida no ensaio (N);

L = Comprimento do corpo-de-prova (mm);

D = Diâmetro do corpo-de-prova (mm).

Figura 16 – Ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: SANTOS et al, 2017.

Por fim Santos (2017) afirma que o módulo de elasticidade é um parâmetro relativo à deformação do concreto sob a ação de tensões, sendo avaliado pelo diagrama de tensão  $\times$  deformação no ensaio de compressão e está relacionado a ductilidade (deformação que o material sofre antes da ruptura). O ensaio deve ser realizado tendo como parâmetro a norma ABNT NBR 8522:2008. Para o cálculo do módulo de elasticidade tem-se a equação:

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

Onde:

$\sigma_b$  é a tensão maior, em MPa ( $b=0,3f_c$ );

$\sigma_a$  é a tensão básica, em MPa ( $a=0,5$  MPa);

$\varepsilon_b$  é a deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão maior;

$\varepsilon_a$  é a deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão básica.

O ganho de resistência do concreto ocorre pela hidratação do cimento em contato com a água da mistura. A hidratação do cimento caracteriza-se pela sequência de reações químicas entre os compostos sólidos e a água, levando a reação de pega e o enrijecimento das misturas cimento-água. Na presença de água, os silicatos e os aluminatos componentes do cimento, formam produtos de hidratação que, com o transcorrer do tempo, dão origem a uma massa firme e resistente. (SANTOS E GODINHO, 2017).

Segundo Amaral Jr (2016), suas propriedades mecânicas definem as vantagens da utilização do concreto como alta resistência à compressão e melhor resistência ao fogo do que outros materiais estruturais como o aço. Além disso, possui uma vida útil bastante longa e é um material de execução e manutenção barata se comparado a outros materiais, podendo também assumir diversas formas. Outra característica bastante procurada no concreto é quanto sua impermeabilidade, característica essencial para obras de estrutura hidráulica como barragens por exemplo. Portanto, para cada especificidade será determinado o tipo de concreto a ser usado com foco em suas propriedades. Um concreto estrutural para edifício por exemplo não precisa se preocupar tanto com a permeabilidade mas sim com as características de resistência e rigidez e para isso podemos ter um concreto mais poroso.

Portanto podemos dizer que tudo se inicia na fase de projeto, determinando o tipo de concreto e dosagem a ser usada e logo após devemos partir para sua fabricação, pois para garantir as propriedades finais em seu estado endurecido, é muito importante verificar se as propriedades em estado plástico (concreto fresco) estão atendendo as normas e especificações (BERNARDO et al, 2016).

Como mencionado acima, algumas propriedades do concreto endurecido dependem fundamentalmente de suas características enquanto no estado fresco. O processo de cura do concreto (endurecimento) é longo (em alguns casos podem ser usados aditivos para acelerar esse processo), podendo levar mais de 2 anos para atingir sua capacidade máxima de resistência e mesmo após atingir esse valor, ele continua aumentando sua resistência com o passar do tempo.

Na prática, adotamos a idade de 28 dias para basear os cálculos estruturais das peças de concreto, onde sua resistência adquiriu entre 75 e 90% da resistência total. Por exemplo: se o calculista precisa de uma determinada peça de concreto tenha resistência à compressão de 35Mpa, esse concreto precisa ser dosado e trabalhado de forma a atingir essa mesma resistência aos 28 dias. A fim de garantir que essa resistência foi atingida, são realizadas coletas do concreto durante seu lançamento para que aos 28 dias ensaios específicos sejam realizados.

Em seu trabalho, Amaral Junior (2016) nos relata que o concreto pode atingir valores de resistência à compressão bastante variados, dependendo de sua composição. Os concretos ditos normais, têm sua resistência variando de 15 MPa a 65 MPa, com valores mais comuns encontrados entre 20 MPa e 35 MPa. A NBR 6118 (2023) norma brasileira de projeto de estruturas de concreto armado, estabelece uma resistência à compressão mínima de 20 MPa para concretos estruturais.

Outra característica importante a ser medida e observada durante a fabricação e lançamento do concreto é a sua trabalhabilidade, que não só vai facilitar o manuseio em seu estado fresco como terá efeito direto em seu bombeamento e construbilidade sem que haja segregação prejudicial do material. Um concreto pouco maleável e de difícil adensamento geralmente terá prejuízos à sua resistência, durabilidade e principalmente aparência. (SILVA, 2019).

Um dos ensaios realizados durante a fase de lançamento, onde o concreto ainda está em estado fresco é o ensaio de abatimento de cone, onde a norma da ABNT NBR 8953:2015 classifica os concretos por sua consistência e possível aplicação conforme Tabela 3 abaixo. A figura 17 mostra o passo a passo da execução do ensaio de abatimento do cone.

Figura 17 – Ensaio de abatimento de cone



Fonte: A autora, 2022.

Tabela 3 – Classe de consistência do concreto

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	$\geq 220$	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

NOTA 1 De comum acordo entre as partes, podem ser criadas classes especiais de consistência, explicitando a respectiva faixa de variação do abatimento.

NOTA 2 Os exemplos desta Tabela são ilustrativos e não abrangem todos os tipos de aplicações.

Fonte: ABNT NBR 8953:2015.

### 2.3.3 Dosagem

Uma das maiores causas de patologia do concreto está ligada a adição de água em sua produção. Sendo este um solvente universal, as trocas físicas e químicas que ocorrem na reação de mistura com os componentes do concreto produzem as vezes ações degenerativas (VASCONCELOS & AKASAKI, 2010).

Segundo Amaral Junior (2016), existem muitos fatores que podem afetar as propriedades do concreto endurecido e o fator água/ cimento é um dos principais deles, onde a resistência mecânica do concreto se mostra menor para misturas com maiores teores de água. Em contrapartida, concretos com baixo índice água/cimento apresentam baixa trabalhabilidade podendo gerar patologias estruturais como brocas ou buracos. (AMARAL JUNIOR, 2016)

A propriedade desejada do concreto varia de acordo com o tipo de obra que será executada, sendo imprescindíveis as propriedades para cada tipo de aplicação. As dosagens entre os constituintes do concreto irão definir a sua resistência final, módulo de deformação e sua durabilidade frente os agentes agressores que serão sujeitados, o traço do concreto é definido pela quantidade de agregado e quantidade de cimento. A quantidade de água de amassamento também influencia a qualidade final do produto (BERNARDO et al., 2016)

Nos experimentos dos trabalhos estudados foi observada uma variação no fator água/ cimento entre 0,35 e 0,65, sendo comumente utilizada na prática o fator 0,40 para concretos convencionais. Com traços mais comuns sendo utilizados 1:2:2 (uma parte de cimento para 2 de agregado graúdo e duas de agregado miúdo).

Tanto o traço quanto o fator água/ cimento são determinantes para entendimento do quanto de substituição da borracha poderá ser feito sem alterar consideravelmente as propriedades mecânicas do concreto.

#### 2.3.4 Controle Tecnológico

Numa obra de construção civil existem inúmeras maneiras para tratar o controle de qualidade dos materiais utilizados. Para o concreto armado o monitoramento é necessário para os materiais que compõem o concreto, uma vez que o aço já tem um controle bastante rigoroso em sua fabricação, que devem atender as especificações da norma ABNT NBR 7480:2007. (JACHINTO et al., 2014).

Toda estrutura de concreto é projetada para trabalhar dentro de uma vida útil programada, devendo resistir aos esforços e mecanismos de resgate a que são submetidas. O acompanhamento de sua confecção bem como das condições de serviço, devem ser acompanhadas e controladas, principalmente em grandes empreendimentos, visando a garantia da segurança e operacionalidade. (FREITAS et al., 2009).

Na maioria dos países o controle tecnológico do concreto é realizado basicamente com ensaios de resistência à compressão axial de corpos de prova moldados no recebimento do concreto no canteiro antes de seu lançamento. Esses ensaios são padronizados no Brasil pela ABNT NBR 5739:2018 e para sua execução é necessário pessoal treinado e material específico que se encontra em laboratórios especializados nesses ensaios e na maioria das vezes distante da obra, dificultando o controle de alguns fatores essenciais para garantia da qualidade como moldagem, armazenamento, capeamento e velocidade de carregamento do corpo de prova.

Além disso, esse tipo de ensaio é realizado em um único corpo modelado, não sendo considerado um fator importante como a aderência aço-cimento, condição essencial para a existência do concreto armado. (JACHINTO et al., 2014).

No projeto e controle de qualidade do concreto, como já mencionado, a Resistência à Compressão Axial é uma propriedade frequentemente especificada, tanto pela facilidade de execução e baixo custo quanto pela importância na segurança da estrutura. A NBR 6118:2023 apresenta equações que estimam a resistência do concreto ao longo do tempo e uma série de expressões para obter resultados estimados de Módulo de Elasticidade e Resistência à Tração por Compressão Diametral em função da Resistência à Compressão Axial.

A fim de resolver os inconvenientes gerados pelos ensaios tradicionais, um grupo de pesquisadores liderados pelo Professor Michel LORRAIN do INSA de Toulouse, vem analisando o emprego de um novo método de ensaio de aderência aço-concreto chamado APULOT que é realizado diretamente no canteiro de obra com mais simplicidade e baixo custo para estimar a resistência à compressão do concreto. Desde sua criação vem sendo testados em universidades dentro e fora do país e tem apresentado resultados satisfatórios com relação a estimativa de resistência a compressão. Como vantagens desse método podemos destacar a redução no tempo de realização caindo de 28 para 7 ou mesmo 3 dias, sua simplicidade de execução e a possibilidade de aferir a aderência aço-cimento, fator de tamanha importância para garantia do perfeito funcionamento do concreto armado estrutural (JACHINTO et al., 2014.).

A busca pela substituição do uso de materiais naturais por resíduos como borracha de pneus na fabricação do concreto vem aumentando e é sabido que a inclusão desse tipo de material diminui a resistência do concreto. Esse novo método de ensaio se mostra ainda mais interessante quando o empregamos para analisar a resistência a compressão e a aderência aço-cimento para concretos armados com adição desse tipo de agregado (JACHINTO et al., 2014).

Segundo Jacinto et al. (2014) para formação do concreto armado estrutural, é necessário que haja uma relação solidária entre os materiais, onde cada um dos elementos deve ser capaz de chegar ao limite de sua capacidade de resistência sem prejudicar ou ser prejudicado pelos esforços atuantes um do outro. Lembrando que o concreto é um composto cerâmico frágil, de alta resistência à compressão e de baixa resistência a tração e o aço um material metálico dúctil e com alta resistência à tração.

O principal conceito do ensaio APULOT é que se realizado em condições controladas e padronizadas, a relação de aderência aço-cimento se torna mais evidente e robusta, permitindo a estimativa de resistência a compressão considerando dados da máxima aderência, realizando o ensaio “in loco”.

Em diversas pesquisas realizadas sobre aderência aço-concreto, considerando o concreto com adição de borracha, pesquisadores concluíram que apesar da diminuição da resistência mecânica e na tensão de aderência apresentar valores inferiores, essa adição de material pode ser usada para concretos estruturais.

Jacinto et al. (2014) fizeram ensaios com corpos de provas de concreto armado com adição de 15% e 20% de borracha e sem adição como referência.

Tabela 4 – Parcelas de resistência mecânicas dos concretos em porcentagem

Concreto	Idade do concreto	Resistência à compressão	Resistência à tração indireta	Resistência à tração na flexão	Módulo de elasticidade
Referência	7 dias	100%	100%	100%	100%
	28 dias	100%	100%	100%	100%
15%	7 dias	63,9%	71,5%	85,2%	86,3%
	28 dias	53,7%	50,6%	93,8%	78,4%
20%	7 dias	39,4%	56,4%	59,7%	46,8%
	28 dias	36,9%	40,8%	72,9%	41,8%

Fonte: JACHINTO et al. 2014.

## 2.4 Adição de resíduos ao concreto e durabilidade

A crescente degradação das estruturas de concreto no Brasil ao longo dos anos vem aumentando a necessidade de pesquisa sobre esse tema. Com isso, o emprego de materiais alternativos na sua fabricação é uma possibilidade atraente para melhoria na qualidade do concreto bem como uma possível diminuição no custo de fabricação.

As preocupações das empresas vão muito além das normas e legislações aplicadas ao ramo, visto que empresas que tem preocupação com o meio ambiente são vistas de forma diferenciada quanto as suas concorrentes. Além de trazer benefícios para toda população, através de suas atitudes podem ter redução de impostos e diminuição de custos de fabricação, reaproveitando materiais que antes seriam descartados. (CARDOSO & CABRAL, 2017).

Silva, et al. (2019) consideram que ocorre a troca de pneus de ao menos 30% da frota total de carros brasileiros calculada em 52 milhões de veículos. A ANIP (2017) estima que em números absolutos seriam mais de 60 milhões de pneus descartados ou sem tratamento adequado todos os anos.

O resíduo de borracha de pneus vem sendo estudado a fim de avaliar sua utilização como agregado no concreto. A reutilização dos resíduos de borracha na construção civil é uma das várias formas de aproveitar o seu potencial, na melhoria de algumas propriedades do concreto e evitar o descarte inadequado destes resíduos auxiliando na questão ambiental e podendo reduzir os custos de produção. (SILVA, 2014).

Assim, a adição desse material ao concreto não só auxilia na questão ambiental como pode reduzir os custos de produção, uma vez que utiliza materiais descartados e sem valor econômico.

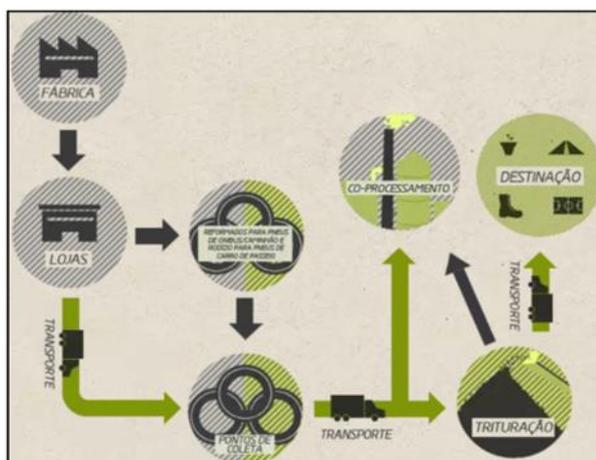
Os processos de fabricação atuais tornam impraticáveis economicamente a reutilização do pneu inservível, devido às ligações cruzadas oriundas do processo de vulcanização da borracha. (FREITAS et al., 2009).

Como informado anteriormente, fabricantes e importadores de pneus novos com peso superior a 2,0kg são obrigados a coletar e dar destinação adequada aos pneus inservíveis existentes em território brasileiro. Deve também haver uma articulação com toda população que faz uso desse material (distribuidores, revendedores, consumidores finais e poder público) para implementação de procedimentos de coleta desses resíduos. (SILVA, et al., 2019).

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. (SILVA et al., 2019).

Na figura 18 abaixo é apresentado o ciclo completo da produção até a destinação dos pneumáticos.

Figura 18 – Ciclo de vida dos pneumáticos



Fonte: ANIP, 2017.

Até pouco tempo atrás, os estudos para incorporação de resíduo de borracha eram feitos apenas em asfalto, já que no concreto armado a inclusão de borracha diminui sua resistência a compressão. Conforme os estudos da inserção da borracha no concreto armado foram avançando, verificou-se que apesar de diminuir a resistência mecânica, as fibras de borracha aumentam a capacidade de deformação atuando como um obstáculo para a propagação de fissuras, aumentando sua capacidade de suportar esforços. (SILVA et al., 2019).

Estudos realizados por Hernandez & Barluenga (2003) mostram que uma adição de 3% de borracha no volume total de concreto apresenta melhores resultados que outras adições no ensaio de resistência a compressão e redução de fissuração e destacamento superficial.

Quanto maior a fissuração do concreto endurecido, mais propensa a ataques de agentes agressores a estrutura está e conseqüentemente sua durabilidade diminui.

Em ensaios realizados por Vasconcelos e Akasaki (2010) para verificar relação da adição de borracha com a durabilidade do concreto observou uma diminuição na resistência a compressão do concreto e também na absorção de água.

Um dos pontos avaliados no ensaio foi que não houve desagregação possivelmente por ter sido utilizado concreto de alto desempenho (acima de 60Mpa).

Foi observado também no ensaio de ciclagem que a adição de borracha de pneu teve a ação de impedir a continuidade das fissuras e auxiliou a contenção da lixiviação (extração ou solubilização dos constituintes químicos de uma rocha, mineral, solo, depósito sedimentar entre outros, pela ação de um fluido percolante) de material carbonático. E ainda com relação aos ataques químicos por ácido láctico, os corpos de prova contendo borracha apresentaram menor perda de massa.

Em geral, ainda com uma diminuição da resistência mecânica, a adição da borracha se mostra eficaz no combate a ação de agentes químicos. (VASCONCELOS & AKASAKI, 2010).

Figura 19 – Resíduos de borracha de diferentes granulometrias



Legenda: (a) resíduos de borracha granulometria grossa (b) – resíduos de borracha granulometria fina.

Fonte: A autora, 2023.

### 3. METODOLOGIA DA PESQUISA

Este trabalho parte de uma revisão bibliográfica.

“Cada nova pesquisa só pode ter significado universal como uma pequena adição aos trabalhos anteriores de outros pesquisadores” (ESPÍRITO SANTO, 1992, p.81).

De acordo com Gil (2008), embora todos os trabalhos acadêmicos de certa forma necessitem de uma pesquisa bibliográfica, existem alguns trabalhos que são elaborados exclusivamente dessa forma, através de análises de fontes bibliográficas de livros, artigos e outros materiais que abordem o tema estudado.

Ainda segundo Gil, este método científico permite ao pesquisador uma ampla quantidade de dados e informações que ele não teria através apenas de suas amostragens e experimentos.

A revisão bibliográfica é o momento em que o autor faz uso de diferentes trabalhos publicados com diversos experimentos e amostragens diferentes que servirão de base para suas análises e conclusões.

Para realização deste trabalho, buscou-se o objetivo principal da elaboração do documento. Posteriormente, iniciou-se uma busca na literatura científica informações sobre o tema e variações do tema. Essa busca percorreu o site da CAPES selecionando cerca de 150 artigos e dissertações que tinham certa relação com a utilização da borracha reciclada para a preparação de concreto, propriedades específicas de concreto estrutural, reciclagem em geral e reciclagem de pneus. Para fazer uma seleção de quais desses textos seriam efetivamente utilizados para o trabalho em questão, o critério de eliminação foram artigos e dissertações que falavam exclusivamente sobre as palavras chaves mencionadas no resumo.

Além disso, o professor orientador também enviou artigos sobre o tema que foram incluídos como material de pesquisa.

Também se somaram à metodologia de pesquisa, os artigos apresentados durante a fase de estudo deste mestrado através de matérias como: Reciclagem, Metodologia Científica, Inovações tecnológicas e Ciência dos materiais, bem como a pesquisa em sites no Google relacionados a reciclagem e informações sobre o pneu e a borracha.

Durante a escrita e separação dos títulos e sub-títulos, procurou-se deixar as informações bem separadas por sub temas a fim de facilitar o entendimento do leitor.

Vale ressaltar que foi encontrado um material muito vasto com informações diversas, mas que em nenhum momento se contradiziam, muito pelo contrário, se complementavam.

As referências consultadas embasaram os referenciais teóricos sobre como se comporta o material concreto nas diversas adições da borracha e com isso pode-se formar uma opinião contundente sobre a utilização deste material na produção de um novo compósito, como será mostrado na conclusão a seguir.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para elaboração deste trabalho foram analisados diversos estudos sobre o tema com os mais diversos experimentos. Em todos foram produzidas uma determinada quantidade de copos de provas e realizados ensaios que serão relatados e resumidos a seguir.

É importante ressaltar que em todos os experimentos foram observadas uma queda na resistência a compressão do concreto (sua principal propriedade), no entanto os estudos buscam a melhor concentração de borracha na mistura para que se tenha o mínimo de redução nesta propriedade, viabilizando assim o seu uso.

Os resultados serão apresentados em ordem cronológica.

Iniciando os estudos por Silveira (2013) onde o autor realizou experimentos com ensaios de resistência à compressão e à tração, módulo de elasticidade e também resistência à fadiga, a fim de fazer a comparação das propriedades mecânicas de um concreto normal com um concreto com adição de borracha em substituição à areia (agregado miúdo) com a porcentagem ótima para alcançar resistências próximas um do outro de modo a verificar a viabilidade deste material na utilização de pavimentação de concreto. O traço adotado nos experimentos foi de 1: 2,06: 2,94 (cimento, areia e brita) com um consumo de cimento de 473 kg/m<sup>3</sup> e relação água/cimento de 0,50 com T1 (traço normal), T2 (traço com adição de 10% de borracha) e T3, T4, T5, T6, T7 e T8 (com aumento do consumo de cimento e adição de 10% de borracha). O cimento utilizado foi o Cimento Portland tipo CP II-Z32 com adição de pozolana.

Com os resultados dos testes Silveira (2013) observou que houve uma queda significativa na resistência à compressão e à tração quando a borracha é adicionada, comparando os traços T1 e T2 porém essa queda não se mostra expressiva quando se aumenta o consumo de cimento, cuja porcentagem ótima para garantir sua utilização para pavimentação sem prejuízo às propriedades do concreto seria de um aumento de 30% (T3) no consumo de cimento, o que torna inviável economicamente e em caráter ambiental. Ele também identificou uma diminuição no módulo de elasticidade quando comparado os traços T1 e T2, mas uma melhora com adição a partir de 5% no consumo do cimento.

Tabela 5 – Relação entre o Módulo de Elasticidade com a Tensão de Ruptura na tração à flexão para os traços T1, T2 e T3

Traço	Tensão Ruptura $\sigma$ (MPa)	Módulo Elasticidade E (MPa)	Relação E/ $\sigma$
T1	4,69	35.758	7.624
T2	2,68	25.359	9.462
T3	4,25	32.078	7.548

Fonte: SILVEIRA, 2013.

Tabela 6 – Resultados de resistência à compressão e Módulo de Elasticidade dos traços T1 a T8

Traço	Tensão Média (Mpa)	Módulo de elasticidade médio (Mpa)
T1	32,34	35.758
T2	18,03	25.359
T3	29,7	32.078
T4	23,2	30.476
T5	24,1	30.503
T6	23,6	29.210
T7	25,9	31.151
T8	25,1	30.371

Fonte: SILVEIRA, 2013.

Próxima autora estudada foi Silva (2014), que em seu trabalho de mestrado realizou experimentos a fim de encontrar uma aplicação viável para resíduo de recauchutagem de pneus na fabricação de piso tátil intertravado de concreto substituindo parcialmente o agregado miúdo.

Em sua revisão bibliográfica, Silva (2014) afirma que estudos comprovam que a substituição de 5% de borracha no volume de agregado miúdo precisa que o fator água cimento seja reduzido e o consumo de cimento aumentado em relação ao traço de concreto convencional, para que não ocorra a perda da resistência à compressão, corroborando com o exposto no estudo acima mencionado. Ela segue relatando que isso ocorre devido à falta de aderência entre as partículas de borracha e a matriz de cimento e acrescenta que o maior teor de ar incorporado bem como a baixa capacidade da borracha em resistir esforços de compressão

e de permitir deformações com mais facilidade, também podem ser responsáveis por essa redução nas propriedades mecânicas do concreto.

Ainda em sua revisão bibliográfica, Silva (2014) apresenta estudos que sugerem que a substituição da borracha não deve exceder 10% do volume de agregado miúdo para concreto estrutural e 40% para concreto não estrutural. Um dos estudos mencionado pela autora, afirma que é possível produzir concreto que atenda as especificações da norma brasileira para ser utilizado em pavimento de concreto substituindo-se até 10% em massa do agregado miúdo por resíduo de borracha, que precisa atingir a resistência à compressão de 35 MPa para tráfego leve e 50 Mpa para tráfego pesado, segundo a norma da ABNT NBR 9781:2013.

Para finalizar seu trabalho de revisão da literatura, Silva (2014) nos apresenta um estudo que relata a necessidade de se encontrar um percentual ótimo para a substituição do resíduo de borracha, uma vez que quando mais baixo, a borracha não fica distribuída uniformemente no concreto ocasionando a redução na resistência à compressão devido ao baixo módulo de elasticidade do material gerando pontos fracos no concreto de modo que a concentração de tensão ocorre em torno das partículas de borracha. Já quando temos uma substituição do agregado miúdo por uma porcentagem de borracha maior que a ótima, a resistência também tende a cair devido a fragilidade da borracha que torna a estrutura do concreto mais porosa e conseqüentemente mais fraca.

Em seus experimentos, Silva (2014) considerou um traço de concreto de referência que pudesse chegar no valor de resistência de 50 Mpa. Para os seguintes corpos de prova foram adicionados percentuais de 10, 20, 30, 40 e 50 de borracha em substituição à areia. Não houve alteração no consumo de cimento (usado o Cimento Portland CP V ARI de alta Resistência Inicial que permite que o concreto atinja altas resistências em poucos dias, indicado para produção de pisos e blocos) e no fator água/cimento, sendo mantidos os valores constantes. Na tabela 7 abaixo são apresentados todos os traços utilizados.

Tabela 7 – Dosagem do concreto com resíduo de borracha de pneus

Teor de Substituição (%)	Traços (proporção em massa)						
	Cimento	Areia	Borracha	Pó de Pedra	Pedrisco	água	Aditivo
0	1	0,77	0,000	2,33	1,11	0,43	0,01
10	1	0,69	0,033	2,33	1,11	0,43	0,01
20	1	0,62	0,067	2,33	1,11	0,43	0,01
30	1	0,54	0,100	2,33	1,11	0,43	0,01
40	1	0,46	0,133	2,33	1,11	0,43	0,01
50	1	0,38	0,167	2,33	1,11	0,43	0,01

Fonte: SILVA, 2014.

Foram produzidos diferentes tipos de corpos de prova para realização dos testes de modo a estudar as seguintes propriedades do concreto:

- a) consistência no estado fresco;
- b) resistência à compressão;
- c) absorção de água;
- d) índice de vazios;
- e) densidade no estado endurecido;
- f) resistência à tração na flexão;
- g) resistência ao impacto;
- h) resistência à abrasão profunda.

Também foi realizada a microestrutura eletrônica de varredura em pequenos pedaços de concreto obtidos no rompimento dos corpos de prova por compressão.

O ensaio de abatimento de cone foi realizado imediatamente após a produção do concreto e antes da moldagem dos corpos de prova. Já os rompimentos dos corpos de prova se deram aos 7 e 28 dias como mostram as figuras e tabelas abaixo:

No ensaio de abatimento de cone pode-se observar uma diminuição na fluidez e trabalhabilidade do concreto, uma vez que quanto maior o teor de borracha menor é o valor do abatimento.

Tabela 8 – Valores do abatimento do concreto

Traços	Data da moldagem	Período	Temperatura(°C)	Umidade (%)	Abatimento (mm)
Ref.	19/09/2013	Tarde	28	64	250
10%	22/10/2013	Tarde	31	54	215
20%	05/11/2013	Tarde	22	73	110
30%	22/11/2013	Manhã	22	92	120
40%	29/01/2014	Tarde	33,5	38	15
50%	12/02/2014	Tarde	32	46	25

Fonte: SILVA, 2014.

Os valores aos 7 e 28 dias aparecem próximos devido ao uso do cimento CPV de alta resistência inicial. Para o ensaio de resistência à compressão foram utilizados dois tipos de diferentes de corpos de prova (cilíndrico e quadrados).

Analisando os dados podemos observar que houve redução da resistência à compressão em todos os percentuais de adição da borracha, no entanto, com o valor de 10% de substituição da areia pelo resíduo de borracha obteve-se um valor de resistência acima dos 50Mpa exigidos pela norma, comprovando sua viabilidade para o uso de pisos intertravados para tráfegos pesados. No corpo de prova quadrado, esse percentual apresentou aos 28 dias, um aumento na resistência à compressão se comparado ao valor de referência. Além disso, todos os resultados apresentaram valores de resistência acima de 35 Mpa, viabilizando também o uso de qualquer dessas porcentagens para utilização em pavimentação intertravada de tráfego leve.

Tabela 9 – Resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos aos 7 e 28 dias

Traço	Idade (dias)	Resistência Média (MPa)
Referência	7	68,53
	28	68,56
10%	7	53,49
	28	53,07
20%	7	49,23
	28	56,76
30%	7	39,72
	28	51,62
40%	7	38,16
	28	49,80
50%	7	39,64
	28	46,23

Fonte: SILVA, 2014.

Tabela 10 – Resistência à compressão dos corpos de prova quadrados em formato de pisos aos 7 e 28 dias

<b>Traço</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>Resistência Média fp (MPa)</b>	<b>Resistência Característica fpk (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Referência	7	60,70	54,80	6,7
	28	65,80	62,20	4
10%	7	61,40	59,90	1,7
	28	66,20	63,60	2,9
20%	7	52,90	51,40	1,7
	28	55,20	51,00	4,7
30%	7	47,70	46,30	1,7
	28	54,30	51,60	3
40%	7	41,90	39,60	2,6
	28	53,00	50,30	3,2
50%	7	45,70	44,70	1,1
	28	49,80	48,40	1,5

Fonte: SILVA, 2014.

De acordo com os experimentos da autora, não houve alteração significativa no valor de absorção de água cujos valores médios ficaram abaixo de 6% e sem nenhum valor individual acima de 7% atendendo o exigido pela norma ABNT NBR 9781:2013.

Esta mesma norma não estabelece valores mínimos para resistência à tração para execução de pisos. No entanto, algumas normas internacionais exigem números entre 2,8 e 5 MPa para pisos de tráfego pesado.

Tabela 11: Resultados da resistência à tração na flexão aos 28 dias

<b>Traço</b>	<b>Resistência Média (MPa)</b>
Ref	10,22
10%	8,22
20%	8,16
30%	7,38
40%	8,13
50%	6,95

Fonte: SILVA, 2014.

Nos ensaios de resistência à abrasão profunda, que está relacionada ao desgaste do concreto, os experimentos mostraram que houve aumento gradativo da resistência à abrasão conforme se aumentava o volume do agregado substituto.

Nos ensaios de resistência ao impacto a autora não obteve resultados satisfatórios para análise.

Para os ensaios de absorção de água e índice de vazios, Silva (2014) identificou que não houve alterações significativas nestas propriedades com a adição da borracha com todas os moldes apresentando baixa absorção de água e baixo índice de vazios.

De acordo com as imagens obtidas na análise de microestrutura por varredura, a autora concluiu que a borracha inserida no concreto ficou totalmente envolvida pela pasta de cimento, no entanto, com o aumento do percentual substituído do resíduo de borracha foram observados aumento de microporos na pasta de cimento, gerando pontos fracos ao redor da borracha impactando na diminuição de suas resistências mecânicas.

Em análise agora os ensaios descritos no artigo de Cardoso & Cabral (2017) onde foram adicionados entre 5% e 10% de resíduo de pneu sem substituição de qualquer material e foram estudadas as propriedades mecânicas e morfológicas para construção de pisos. Foi utilizado um traço de 1:2:3 com fator água/ cimento de 0,66 e diferentemente dos experimentos feitos por Silva (2014), houve a necessidade de acréscimo de 27% de água para as amostras com concentração de 10% de borracha. Sendo assim, nenhum dos corpos de provas com concentrações diferentes e o CP de referência possuíam o mesmo traço. Essa informação é importante de ser mencionada, uma vez que os resultados se comportaram de maneira diferente.

Vale ressaltar que para concretos, a norma ABNT NBR 6118 (2023), indica que a relação água/cimento em massa deve ser de, no máximo, 0,65. Grande parte dos defeitos ocorridos nas propriedades mecânicas de um concreto é devido ao excesso de água, no entanto, a escassez de água no produto pode não ser suficiente para hidratar o cimento, reduzindo então a resistência mecânica do material.

No estudo de Cardoso & Cabral (2017) foi utilizado o cimento CPIII e foram moldados 12 corpos de prova com rompimento aos 28 dias para realização do ensaio de compressão axial e posteriormente análise morfológica desses mesmos CPs através do MEV, onde foram analisadas a morfologia interna das vigas oriundas dos ensaios de compressão axial.

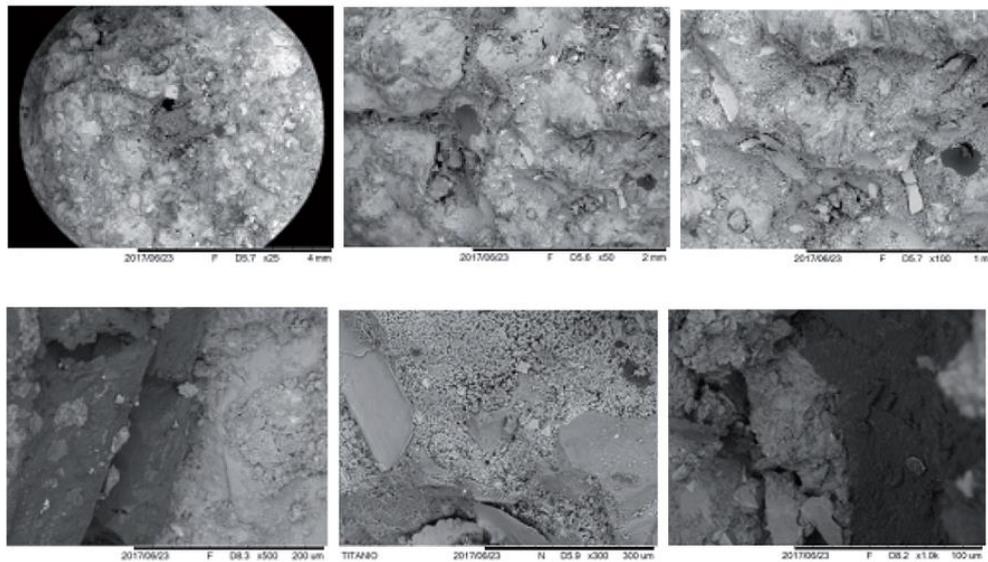
Tabela 12: Resultados do ensaio de compressão aos 28 dias

	CP1			CP2			CP3			Média	Média	Desvio	Desvio
	Área (cm <sup>2</sup> )	Força (KN)	Tensão (mpa)	Área (cm <sup>2</sup> )	Força (KN)	Tensão (mpa)	Área (cm <sup>2</sup> )	Força (KN)	Tensão (mpa)	Força (KN)	Tensão (mpa)	Força (KN)	Tensão (mpa)
<b>0%</b>	78,54	201,8	25,6	78,5	200	25,5	78,5	205	26,1	202,5	25,7	-	-
<b>5%</b>	78,54	181,5	23,1	78,5	177	22,5	78,5	203	25,7	187,03	23,7	15,47	2,0
<b>10%</b>	78,54	163,8	20,8	78,5	166	21,1	78,5	162	20,5	163,8	20,8	38,7	4,9

Fonte: CARDOSO & CABRAL, 2017.

Com a menor quantidade foi observada uma perda de tensão de cerca de 8% e esse valor sofre uma perda ainda maior com a adição de 10% de borracha chegando aproximadamente aos 20% a menos de resistência à compressão quando comparado ao traço de referência. Foi observado que não há uma relação fixa entre o quantitativo de adição da borracha e a perda da resistência já que dobrando a quantidade inserida não se obteve mais que o dobro de perda da resistência mecânica. Observaram através das imagens de MEV (figura 20) que não houve uma perfeita homogeneização entre os elementos da pasta de cimento com a borracha, ainda assim, entenderam que através da análise das imagens que o pneu agregava propriedades no produto final e chegaram a conclusão final de que com o acréscimo de 5% de borracha na confecção do concreto, mesmo apresentando perdas de resistência, existe a viabilidade na aplicação da borracha para possíveis produtos que trabalhem com recebimento de caga distribuída e não pontuais como é o caso dos pisos intertravados. (CARDOSO & CABRAL, 2017).

Figura 20 – Imagens estruturais MEV



Fonte: CARDOSO & CABRAL, 2017.

Na sequência, revisaremos o estudo de Ávila (2017), onde a autora avalia as propriedades mecânicas do compósito de concreto com adição de resíduos de borracha de pneus provenientes do processo de recapagem com granulometrias variando entre 300 $\mu$ m e 2000 $\mu$ m com e sem tratamento à base de acetona 50%. Em seus experimentos, foram construídos corpos de prova de formatos diferentes, cilíndricos (20mm de diâmetro x 40mm de altura) e retangulares (127mm x 12,7mm x 12,7mm) com variação de 5%, 20% e 30% na adição de borracha com relação ao volume total de cimento (usado o CII-F-32) e a relação água/ cimento em 0,35 para todos os moldes.

Figura 21– Corpos de prova de compressão/densidade fabricados em molde de borracha de silicone, pós ensaio de compressão



Fonte: ÁVILA 2017.

Este estudo não buscou estudar o material concreto e sim a substituição completa do agregado por borracha objetivando verificar se existe diferença em relação aos materiais com agregado, ou seja, isolando apenas a interação entre o cimento hidratado com a partícula de borracha. Apesar de a maioria dos trabalhos da literatura indicarem que as propriedades mecânicas evoluem de maneira inversamente proporcional a quantidade de borracha adicionada na argamassa ou concreto.

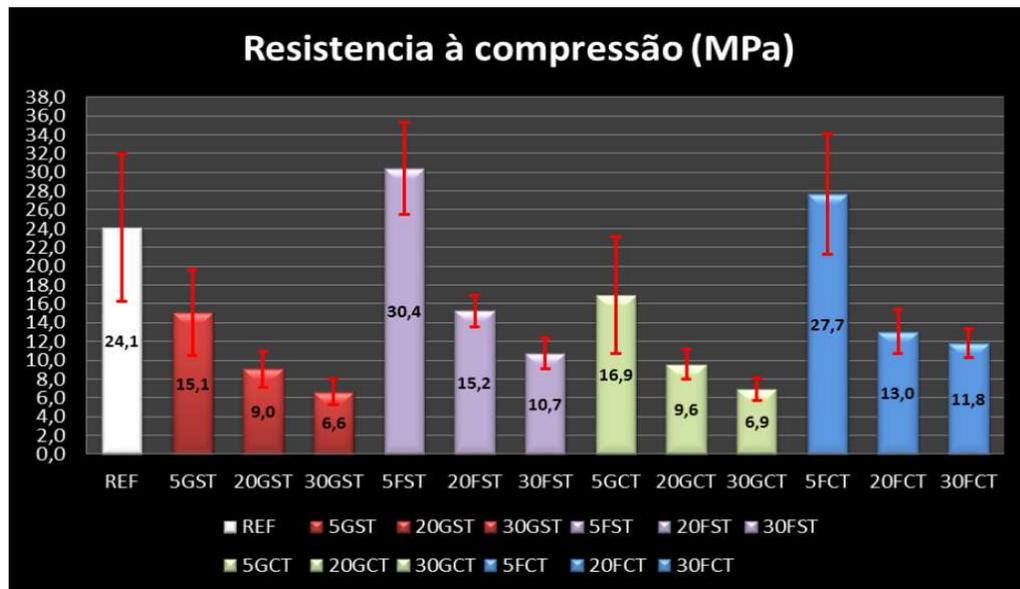
Segundo Ávila (2017), sua pesquisa bibliográfica apontou que a maioria dos pesquisadores que trabalharam com concreto, argamassa e cimento asfáltico indica que incorporações de até 10% apresentam melhores efeitos nas propriedades mecânicas dos materiais fabricados.

Tabela 13: Planejamento de experimento e nomenclatura

Planejamento fatorial 3 <sup>1</sup> 2 <sup>2</sup>				
Condições experimentais		Fatores		
Número	Nomenclatura	Fração aparente de resíduo de pneu (%)	Tamanho da partícula (Granulometria)	Natureza da partícula
1	5GST	5	Grossa	<i>Sem tratamento</i>
2	20GST	20	Grossa	<i>Sem tratamento</i>
3	30GST	30	Grossa	<i>Sem tratamento</i>
4	5FST	5	Fina	<i>Sem tratamento</i>
5	20FST	20	Fina	<i>Sem tratamento</i>
6	30FST	30	Fina	<i>Sem tratamento</i>
7	5GCT	5	Grossa	<i>Com tratamento</i>
8	20GCT	20	Grossa	<i>Com tratamento</i>
9	30GCT	30	Grossa	<i>Com tratamento</i>
10	5FCT	5	Fina	<i>Com tratamento</i>
11	20FCT	20	Fina	<i>Com tratamento</i>
12	30FCT	30	Fina	<i>Com tratamento</i>

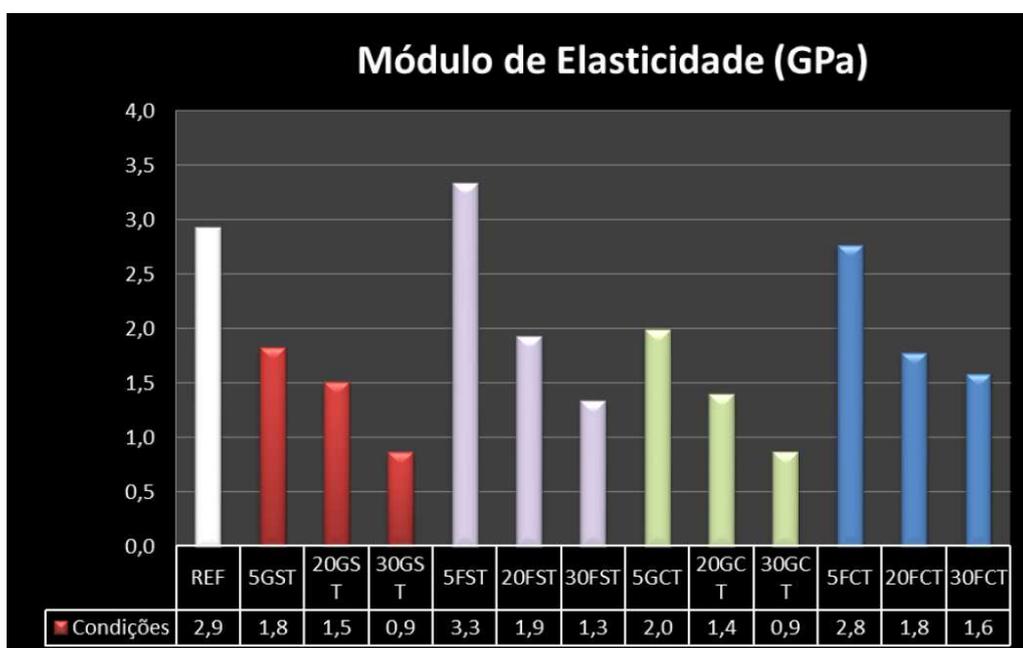
Fonte: ÁVILA 2017.

Figura 22– Representação gráfica da média entre as réplicas das condições experimentadas na variável resposta resistência a compressão



Fonte: ÁVILA 2017.

Figura 23– Gráfico resultados do módulo de elasticidade no ensaio de compressão



Fonte: ÁVILA 2017.

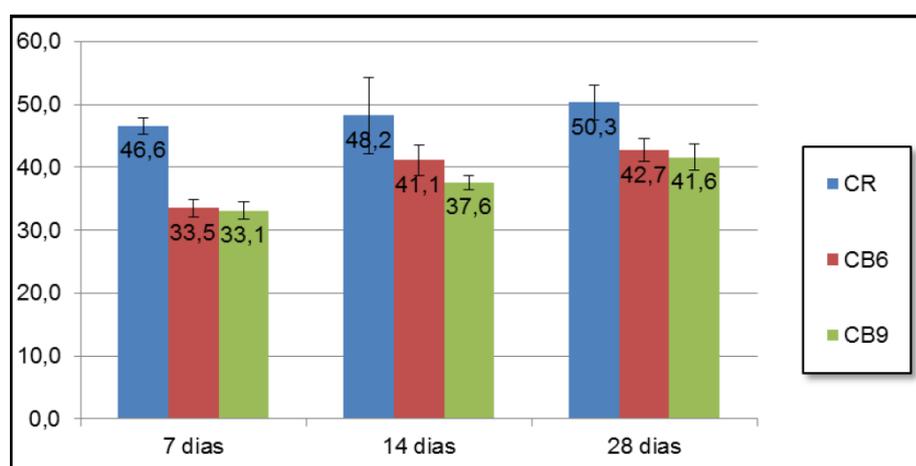
Os resultados de Ávila (2017) foram bastante satisfatórios e mostraram um ganho considerável de resistência à compressão (37%) e módulo de elasticidade (12%) com o percentual de adição de 5% de borracha fina. Já com a adição de 30% de borracha grossa a autora obteve como resultado um ganho de 18% na resistência ao impacto. Com relação ao tratamento dos resíduos de borracha com acetona, não houve resultados significativos a serem considerados. No entanto, vale lembrar que esse estudo não considera a adição de areia e brita, portanto, não pode ser considerado concreto. Sendo assim, outros estudos precisam ser realizados para que uma comparação mais precisa e correta seja feita, analisando-se todas as propriedades necessárias à aplicação do material.

Silva et al. (2019) fizeram também ensaios em corpos de prova de concreto com adição de borracha. Com relação a resistência a compressão chegaram as mesmas conclusões que as pesquisas anteriores revelaram, a adição de borracha promove a queda gradativa da resistência mecânica do concreto. Concluíram que existe uma relação inversamente proporcional entre a quantidade de borracha adicionada no concreto e a baixa da resistência a tração também foi analisada e ainda que em menor proporção teve uma redução com a adição do material em estudo ao concreto.

Em seus experimentos, Silva et al. (2019) utilizaram o cimento CP II-F-40, areia natural, seixo de origem quartzosa, água, e resíduo de borracha de pneus, proveniente do processo de

recauchutagem. Com o objetivo de avaliar a viabilidade de aplicação deste material para confecção para peças e elementos pré-moldados, o  $F_{ck}$  em 35 Mpa foi fixado, conforme o que estabelece a ABNT NBR 9781 (2013). Foi estabelecido também o fator água/ cimento em 0,45. Sendo assim, o traço final ficou da seguinte forma: (1: 1,17: 2,74), onde 3 variações foram consideradas: CR (sem adição de resíduo), CB6 com adição de 6% de borracha e CB9 com 9% em massa de borracha, em relação ao agregado miúdo. Não houve substituição de agregado. A porcentagem de adição foi definida após análise da bibliografia existente, devido aos estudos terem demonstrado que frações na faixa de 5% a 10% de resíduo, proporcionavam os melhores resultados para o concreto. Seguem os resultados obtidos:

Figura 24 – Ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: SILVA et al 2019.

Os resultados dos ensaios de compressão axial demonstram, assim como apresentado na grande maioria dos experimentos estudados, que existe uma relação inversamente proporcional entre a quantidade de borracha inserida no concreto e sua perda de resistência.

Os autores Silva et al (2019) concluíram que a relação ótima para adição da borracha é de 9% para aplicabilidade de concreto para piso, uma vez que existe uma utilização maior da borracha (cujo propósito é justamente a maior utilização desse resíduo) e ainda se obtém a resistência à compressão acima dos 35Mpa exigidos por norma.

## CONCLUSÃO

Diante das análises realizadas em diferentes estudos sobre a adição de borracha ao concreto, é possível inferir que essa prática influencia de maneira significativa suas propriedades mecânicas quando comparadas ao concreto convencional. Os resultados indicam tendência geral de diminuição na resistência à compressão e na tensão de aderência, bem como há redução na trabalhabilidade do concreto e uma relação inversamente proporcional entre a quantidade de borracha adicionada e a resistência à tração.

No entanto também indicam que utilizando um percentual baixo de borracha, é possível sua substituição na utilização de concreto para pisos gerando economia na produção do composto e benefícios ambientais com a retirada desses resíduos do meio ambiente.

Observa-se que a perda de resistência não segue um padrão linear em relação ao aumento do teor de borracha, sugerindo uma complexidade na interação entre esses materiais. Essas descobertas ressaltam a importância de realizar mais pesquisas para entender melhor os efeitos da adição de borracha ao concreto e estabelecer estratégias adequadas para sua utilização, visando minimizar as perdas de resistência e maximizar os benefícios proporcionados por esse material reciclado.

### Sugestões para trabalhos futuros

- a) Análise econômica da substituição do agregado natural por resíduo de borracha para fabricação de concreto estrutural (inclusive pode ser feito através de estudo bibliográfico);
- b) Realizar comparações entre bibliografias similares uma vez que as variáveis são muitas, tais como:
  - adição ou substituição da borracha e seus percentuais;
  - fator água cimento;
  - tratamento e origem da borracha;
  - composição da borracha;
  - granulometria.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5732: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. NBR 5739: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023.

\_\_\_\_\_. NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

\_\_\_\_\_. NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. NBR 7480: Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado - Requisitos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. NBR 8953: Concreto - Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação — Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. NBR 11578: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 2018.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019. São Paulo - SP, 2019.

ALCANZAS, J. C. Durabilidade dos compósitos cimentícios adicionados de borracha de pneus inservíveis UFMS – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande - MS, 2018.

AMARAL JUNIOR, José Coelho do, Avaliação da influência da adição de fibras poliméricas nas propriedades térmicas e mecânicas do concreto, CEFET/MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2016.

ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos, Resultados dos fabricantes nacionais de pneus 3º trimestre de 2017 Disponível em:<<https://www.anip.org.br/anip-em-numeros/publicacoes>> Acesso em: 13 jan 2021.

ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos, Resultados do setor de pneus 2021. Disponível em: <<https://www.anip.org.br/anip-em-numeros/publicacoes>>. Acesso em: 20 jun 2022.

Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus, Pneu vai muito além da borracha. Disponível em: <http://abr.org.br/noticia/partes-do-pneu>. Acesso em: 13 jan 2020.

ÁVILA, L. M. Caracterização das propriedades mecânicas de compósitos de cimento Portland com incorporação de resíduos de pneus. Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei - MG - Brasil, 2017.

BERNARDO, R.M.; LUENA, F.T.R.; DE LIMA, D.F.; DE MEDEIROS, F.K.; FERREIRA, H.S.; BEZERRA, U.T.; FILHO, R.M. (1); ARAUJO FILHO, F.T. Avaliação das propriedades mecânicas do concreto (consistência do concreto e resistência à compressão aos 7 e 28 dias) utilizado no sistema construtivo composto por Concreto-PVC: Estudo de caso 22º CBECi Mat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, RN, 2016.

CARDOSO, G.N. e CABRAL, R.F. Produção e caracterização de compósitos de concreto com adição de pneus automotivos. Revista Teccen. Volta Redonda, Rio de Janeiro – Brasil, 2017 Jun/Dez.; 10 (2): 18-23.

Como ler a marcação do seu pneu. Disponível em: <https://www.bfgoodrich.pt/pt/conselhos/Saber-tudo-sobre-pneus/Como-ler-a-marcao-de-um-pneu> Acesso em: 04 ago. 2021.

Conheça seu pneu. Disponível em: <http://www.ost.ind.br/portal/institucional/conheca-seu-pneu>. Acesso em: 06 ago. 2021.

Conheça seu pneu. Disponível em: <<http://www.dunloppneus.com.br/conheca-seu-pneu/saiba-ler-seu-pneu>>. Acesso em: 06 ago. 2021.

COSTA T. H. S., FONTANA J. A. C., KOSSAKA J. TARASZKIEWICZ T.; Estudo do Comportamento Mecânico de alguns Termoplásticos; Departamento de Engenharia Mecânica/DEMEC; Universidade Federal do Paraná; Curitiba – PR; 1998.

ESPÍRITO SANTO, A. Delineamentos de Metodologia Científica, 1992, p.81.

FREITAS, C.; GALVÃO, J. C. A.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; FILHO, C. V. G.; FERREIRA, E. S. Desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus. Quim. Nova, Curitiba – PR, Brasil - Vol. 32, No. 4, 913-918, 2009.

GIDRÃO, G. de M. S. Propriedades dinâmicas do concreto e relações com sua microestrutura. Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo - SP - Brasil, 2015.

GIL, Antônio Carlos Métodos e técnicas de pesquisa social Sexta Edição p. 50-51, 2008.

GOUVEIA, L. S.; Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. SciELO - Scientific Electronic Library Online -

Artigo • Ciênc. saúde coletiva 17, Vila Clementino – SP - Brasil, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-81232012000600014>>. Acesso em: 18 set 2023.

HERNÁNDEZ, F. O.; BARLUENGA, G. Fire Performance of Recycled Rubber-Filled High-Strength Concrete. *Cement and Concrete Research*, Elmsford, v. 34, n. 1, p. 109-117., 2003.

IBAMA, RELATÓRIO PNEUMÁTICOS - Resolução Conama nº 416/09, Brasília-DF, 2023. Disponível em: < <https://www.gov.br/ibama/pt-br/servicos/relatorios/pneumaticos>>. Acesso em: 18 set 2023.

Inspeção de pneus com raio-x. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/pneus/ensaios-no-fabrico-de-pneus/inspecao-de-pneus-com-raios-x/>. Acesso em: 04 ago. 2021.

JACHINTO A. E. P. G. de A; PIMENTEL, L. L.; BARBOSA M. P.; FONTANINI, P. S. P. Aderência aço e concreto: uma contribuição ao estudo do método APULOT usando concreto com borracha. *Revista Ibracon de estruturas e materiais*, Campinas, SP, Brasil - Volume 7, Number 5 (October 2014) p. 817-844 • ISSN 1983-4195.

LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. Disponível em: < [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 18 set 2023.

MOHAJERANI, Abbas; BURNETT, Lucas; SMITH, John V.; MARKOVSKI, Stefan; RODWELL, Glen; RAHMAN, Md Tareq; KURMUS, Halenur; MIRZABABAEI, Mehdi; ARULRAJAH, Arul; HORPIBULSUK, Suksun. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: a review. *Resources, Conservation And Recycling*, [S.L.], v. 155, p.104679, abr. 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>>. Acesso em: 18 set 2023.

NERY, Suzana Maia; FREIRE, Amanda Silveira A Economia Circular e o Cenário no Brasil e na Europa XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Joinville-SC, 2017.

O que é um pneu. Disponível em: [http://ctborracha.com/?page\\_id=8919](http://ctborracha.com/?page_id=8919). Acesso em: 07 fev. 2021.

OLIVEIRA, M. A. S.; Cassu, S. N.; MELLO, S. A. C.; DUTRA, J. C. N.; Influência do método de vulcanização nas propriedades mecânicas e na densidade de ligações cruzadas da borracha natural. *Polímeros* Vol.26 p.43-48, 2016.

Pedaços de pneu triturado. Disponível em: <https://www.utep.com.br/pedacos-de-pneus-triturado.php>. Acesso em: 08 nov 2021.

PREFEITURA DE SALVADOR, Publicação do facebook na linha do tempo. Disponível em: <https://www.facebook.com/prefeituradesalvador/photos/a.476975768984741/2598576420157988/?type=3&theater>. Acesso em: 13 jan 2020.

Resolução CONAMA nº 416 de 30/09/2009. Disponível em: < [https://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=597](https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=597)>. Acesso em: 04 jun. 2021.

RODRIGUES, E. B., Estudo da estabilidade das propriedades mecânicas e químicas de compostos de borracha vulcanizados com enxofre após envelhecimento térmico e oxidativo. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

RODRIGUES, Cristiano Millani; HENKES, Jairo Afonso RECICLAGEM DE PNEUS: ATITUDE AMBIENTAL ALIADA À ESTRATÉGIA R. gest. sust. ambient., Florianópolis-SC, 2015.

SALES, A. S. B.; NAHIME, B.O. Estudo do resíduo de borracha de pneu em compósitos cimentícios comparado a pérola de poliestireno expandido, na confecção de concreto leve. CONCILIUM, VOL. 24, Nº 1, ISSN: 0010-5236, 2024.

SANTOS, D. D. dos; GODINHO, D.S.S. Análise da evolução das propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo. UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense, SC - Brasil, 2017.

SANTOS, L. E. M. dos Estudo de estrutura pré-moldada com adição de resíduo de pneu. Universidade Federal do Pará, Belém, PA – Brasil, 2016.

SIDDIKA, Ayesha; MAMUN, Md. Abdullah Al; ALYOUSEF, Rayed; AMRAN, Y.H. Mugahed; ASLANI, Farhad; ALABDULJABBAR, Hisham. Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: a review. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 224, p. 711-731, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108>.

SILVA, F. M. da Análise da aplicação de resíduo de borracha de pneus em piso tátil intertravado de concreto. Universidade Estadual de Campinas, Limeira - SP - Brasil, 2014.

SILVA, F. M. da Propriedades físico-mecânicas e durabilidade do concreto de alto desempenho com incorporação de resíduo de borracha de pneus. Universidade Estadual de Campinas, Limeira - SP - Brasil, 2019.

SILVA, L. S.; NASCIMENTO, F. R.; NOGUEIRA, M. H. P.; LIMA, G. K. M.; SOBRINHO, D. C. R. Utilização de resíduos de borracha de recauchutagem de pneus na composição de asfalto. RCT Revista de Ciência e Tecnologia, Belém – PA - Brasil, V.4 n.7 2018 • ISSN 2447-7028.

SILVA, L. S.; NOGUEIRA, M. H. P.; LIMA, G. K. M.; CIPRIANO, F. DA S.; BATISTA, N. J. DA S. Concreto alternativo com utilização de resíduos de borracha de recauchutagem de pneus para elementos e componentes pré-fabricados. RCT Revista de Ciência e Tecnologia, Belém – PA - Brasil, V.5 n.8 2019 • ISSN 2447-7028.

SILVEIRA, P. M. Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação com adição de borracha. UNESP – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira – SP - Brasil, 2013.

STRAUCH, M.; ALBUQUERQUE, P.P., Resíduos: como lidar com recursos naturais. Editora Oikos, São Leopoldo – RS – Brasil, 2008.

VASCONCELOS, A. R. B. de; AKASAKI, J. L. Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu. Ambiente Construído, Porto Alegre, RS v. 10, n. 1, p. 77-90, jan./mar. 2010.

Vulcanização de pneus. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/pneus/o-fabrico-de-pneus/vulcanizacao-de-pneus/>. Acesso em: 04 jun. 2021.

ZULCÃO, R.; COELHO, F. Z.; CALMON, J. L. O efeito da incorporação da borracha de resíduo de pneu no impacto ambiental do concreto autoadensável: Uma abordagem da avaliação do ciclo de vida. UFES - Universidade Federal do Espírito Santo, São Leopoldo – ES – Brasil, 2017.