

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DO SERTÃO
CURSO: ENGENHARIA CIVIL**

MICAEL ALVES MENDES

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO
RECICLADO E BORRACHA TRITURADA**

DELMIRO GOUVEIA – AL

2023

MICAEL ALVES MENDES

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO
RECICLADO E BORRACHA TRITURADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Msc. Alexandre Nascimento de Lima

DELMIRO GOUVEIA – AL

2023

Universidade Federal de Alagoas

Biblioteca do Campus Sertão

Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza CRB-4/2209

M538a Mendes, Micael Alves

Análise de desempenho de concreto com agregado graúdo reciclado e borracha triturada / Micael Alves Mendes. - 2023.
59 f. : il.

Orientação: Alexandre Nascimento de Lima.
Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2023.

1. Construção civil. 2. Concreto. 3. Borracha do pneu. 4. Borracha triturada. 5. Resíduos. 6. Materiais. 7. Reciclagem. I. Lima, Alexandre Nascimento de. II. Título.

CDU: 624.05

MICAEL ALVES MENDES

Análise de desempenho de concreto com agregado graúdo reciclado e borracha triturada

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 12 de maio de 2023.

Documento assinado digitalmente
 ALEXANDRE NASCIMENTO DE LIMA
Data: 19/05/2023 18:32:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Msc. Alexandre Nascimento de Lima, UFAL (Orientador)

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 JORGE LUIS OLIVEIRA SILVA
Data: 16/05/2023 12:33:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Msc. Jorge Luis Oliveira Silva (Examinador Externo)

Documento assinado digitalmente
 KARLISSON ANDRE NUNES DA SILVA
Data: 19/05/2023 15:38:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Msc. Karlisson André Nunes da Silva, UFAL (Examinador Interno)

Aos meus pais, que deram a vida por este sonho.
A minha tia Eliana e ao meu tio Sebastião que me
deram forças para seguir com este sonho.
As minhas amadas avós Marias que sonharam este
sonho comigo.

AGRADECIMENTOS

Mesmo sabendo que palavras nunca serão o suficiente, primeiramente declaro toda minha gratidão a minha mãe **Maria Clara**, que tornou dela todo esse sonho e que tanto batalhou por esta realização. Por toda confiança e dedicação a minha pessoa durante esses anos.

Ao meu pai, **Gonzaga**, por lutar incansavelmente para que eu conquistasse o sonho de minha graduação, e por todo incentivo durante esses tempos difíceis.

Aos meus irmãos, **Marcos e Pedro**, e minhas irmãs **Poliana e Milena**, que completam essa grande família, que me deram tanto proposito para aguentar as diárias crises longe de casa.

À minha querida tia **Sandra**, que com todo seu delicado amor não retém para si o quanto acredita em mim. De modo geral, a *toda a minha família*, que sempre se fizeram presentes e se tornaram corresponsáveis por todas as minhas conquistas.

De maneira especial, minha eterna gratidão àquelas que antes que eu pudesse desejar desacreditar, acreditaram em mim primeiro, **Luana e Valeria**, minhas irmãs de alma, assim como a sua respectiva mãe **Luzinete**, que por tanto tempo acreditou que tudo isso era possível.

Às minhas queridas amigas, parceiras que tanto me apoiaram ao longo de todos esses anos, compartilhando os perrengues, os dias de luta e os dias de glória da vida universitária, **Vivian, Nathalie, Lany, Rikelly, Vitoria e Isabelly**. Obrigado por serem minha família quando a minha estava há kms de distância.

Ao meu grande amigo **Hildegard Junior**, que tanto me ajudou e tanto me ensinou nas horas em que de nada eu sabia, também por sua amizade e seus conselhos de irmão, também ao meu grande amigo **Josiclecio**, por toda sua disposição em me ajudar, me apoiar e por todo seu companheirismo.

À **I9** e todas as amizades que pude construir dentro do *Movimento Empresa Júnior*. Estes sem dúvidas foram viradas de chave para minha transformação como pessoa e como profissional. De modo especial, aos meus maravilhosos amigos, **Coutinho e Fabricio**, que hoje tenho o prazer de dizer que são irmãos de outra mãe, e que tanto me ensinaram, sempre acreditaram em mim e nas minhas capacidades.

Às minhas amigas **Itana e Victoria**, que fizeram parte da minha trajetória na I9 e se tornaram especiais durante grande parte desse ciclo de perrengues e alegrias.

Às minhas amigas **Jaiane e Gabi**, que desde do IF Sertão fazem parte da minha vida e que por tanto me deram forças para seguir em frente.

À todas as pessoas e *colegas de curso* que somaram ao longo desses anos na minha trajetória, de modo particular, a minha amada **turma 2017.1**, por toda parceria e amizade.

Aos meus grandes amigos “irmões” **Murilo, Felipe, Leo, Ewerton, Anthony, Noe, Ailton, Nathan e João**, que dividiram a casa e grande parte desses 5 anos comigo, que nas horas mais difíceis estavam sempre presentes e que por muito me deram alegria e felicidade através da republica BP.

À minha queridíssima amiga **Fabiana** por todo cuidado e zelo para comigo. Por ser uma pessoa incrível e uma amiga melhor ainda, por ter sido uma segunda mãe para mim durante todo esse tempo longe de casa.

Ao meu queridíssimo amigo e orientador **Prof. Alexandre** por todo cuidado, zelo e ensinamentos para comigo. Por ser uma pessoa incrível e um excelente profissional, que se oferta e está sempre disposto a fazer pelos seus.

À minha queria amiga **Andreza**, que acreditou tanto no meu potencial dentro da I9 e tanto me incentivou e ensinou durante todo meu tempo dentro da EJ, por todo apoio, carinho e conselhos dentro da Ethica, assim como também a **Maria Clara**, que se tornou uma grande amiga e que sempre me apoiou e me deu forças.

Ao **Eng. Gustavo**, meu supervisor de estágio a quem eu aprendi tanto sobre ser uma pessoa melhor e um bom profissional, no canteiro e na vida. Me ensinando e orientando a aprender sempre com os meus erros.

A todo o **corpo docente** da **Universidade Federal de Alagoas, Campus Sertão**, por terem contribuído assertivamente na minha formação.

RESUMO

Neste estudo pretende-se analisar a resistência e a absorção do concreto com o acréscimo da borracha extraída de pneus velhos em relação ao agregado miúdo e pela substituição do agregado graúdo pelo resíduo do corpo de prova de concreto, em comparação com o concreto convencional, ou seja, sem o acréscimo da borracha. Para este estudo foi utilizado a borracha e o resíduo do corpo de prova, sendo que tivemos a substituição da totalidade do agregado graúdo pelo resíduo, enquanto a borracha tivemos um acréscimo em relação ao agregado miúdo, na proporção de 5%, 10% e 15%. A partir dos ensaios executados e dos resultados obtidos é possível analisar e avaliar o desempenho do concreto, partindo dessa análise é possível definir se é ou não é possível a sua utilização em comparação com o concreto convencional, tendo em vista à redução de entulho na construção e a retirada de pneus que estariam sendo destinados a poluição da natureza. Analisando os resultados obtidos, pode-se notar uma leve tendência ao aumento da absorção no concreto com a adição da borracha em relação ao concreto sem a borracha, enquanto ao mesmo tempo que a absorção aumenta, a resistência a compressão tende a diminuir de acordo com o aumento da porcentagem da borracha acrescida no concreto.

Palavras-chave: Concreto; Borracha; Resíduo.

ABSTRACT

In this study, we aim to analyze the strength and absorption of concrete with the addition of rubber extracted from old tires in relation to the fine aggregate and by replacing the coarse aggregate with the residue of concrete specimens, compared to conventional concrete, i.e., without the addition of rubber. For this study, rubber and concrete specimen residue were used, with the entire coarse aggregate being replaced by the residue, while the rubber was added in relation to the fine aggregate at a ratio of 5%, 10%, and 15%. Based on the tests performed and the results obtained, it is possible to analyze and evaluate the performance of the concrete. Based on this analysis, it is possible to determine whether or not its use is possible compared to conventional concrete, with a view to reducing waste in construction and removing tires that would otherwise contribute to environmental pollution. Analyzing the results obtained, it is possible to note a slight tendency towards an increase in absorption in the concrete with the addition of rubber compared to the concrete without rubber, while at the same time, as the percentage of rubber added to the concrete increases, the compressive strength tends to decrease.

Keywords: Concrete; Rubber; Residue.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produção de lixo por pessoa ao ano em cada país.....	15
Figura 2 – Produção de resíduos em cada região do brasil.....	16
Figura 3 – Símbolo da reciclagem	17
Figura 4 – Símbolo da reciclagem	18
Figura 5 – Guia prático de reciclagem.....	19
Figura 6 – Coleta seletiva.....	20
Figura 7 – Ações que geram economia e fazem bem para a natureza	21
Figura 8 – Resíduos na construção civil	22
Figura 9 – Processo de separação dos resíduos	23
Figura 10 – Corpo de prova de concreto	24
Figura 11 – Fonte geradora de resíduos na construção civil	25
Figura 12 – Equipamento de britagem	26
Figura 13 – Ensaio Los Angeles	27
Figura 14 – Pneus descartados inadequadamente	29
Figura 15 – Corte do Pneu.....	30
Figura 16 – Processo de recauchutagem	31
Figura 17 – Ciclovia de concreto com uso da borracha.....	32
Figura 18 – Moldes untados	34
Figura 19 – Material utilizado.....	35
Figura 20 – Preparo do concreto em betoneira	35
Figura 21 – Ensaio de Slump Test.....	36
Figura 22 – Número de camadas para moldagem dos corpos de prova.....	37
Figura 23 – Armazenamento dos CPs	38
Figura 24 – Processo de cura dos CPs.....	38
Figura 25 – Processo de banho maria	39
Figura 26 – Processo de rompimento dos CPs.....	40
Figura 27 – Corpo de prova após o seu rompimento	41
Figura 28 – Gráfico da granulometria da borracha.....	43
Figura 29 – Gráfico da granulometria da areia.....	44
Figura 30 – Gráfico de comparação da absorção.....	48
Figura 31 – Gráfico de comparação das amostras 01 a 04	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais em massa necessários para 1 m ³ de concreto.....	42
Tabela 2 – Granulometria da borracha.....	43
Tabela 3 – Granulometria da areia	44
Tabela 4 – Resultados das massas específicas da amostra 01	45
Tabela 5 – Resultados das massas específicas da amostra 02.....	46
Tabela 6 – Resultados das massas específicas da amostra 03.....	46
Tabela 7 – Resultados das massas específicas da amostra 04.....	47
Tabela 8 – Resultados das resistências da amostra 01	49
Tabela 9 – Resultados das resistências da amostra 02	49
Tabela 10 – Resultados das resistências da amostra 03	50
Tabela 11 – Resultados das resistências da amostra 04	50

SUMÁRIO

1	INTRUDUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Geral	14
1.1.2	Específicos	14
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO	15
2.1	A geração de resíduo mundial	15
2.2	A reciclagem	17
2.2.1	A importância da reciclagem	19
2.2.2	A coleta seletiva	20
2.3	Reciclagem na construção civil	22
2.4	Corpo de prova de concreto	23
2.4.1	Resíduo do concreto.....	25
2.5	A obtenção dos resíduos do corpo de prova	26
2.5.1	Equipamentos de trituração dos resíduos	26
2.6	A borracha do pneu	28
2.6.1	Características do pneu	29
2.6.2	Processo de descarte e obtenção da borracha do pneu	30
2.7	O uso da borracha no concreto	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	Traço do concreto	33
3.2	Moldagem dos corpos de provas (CPs)	34
3.3	Armazenamento e cura dos corpos de prova (CPs)	37
3.4	Ensaio de determinação da absorção da água, índices de vazios e massa específica dos corpos de prova (CPs)	39
3.5	Ensaio à compressão dos corpos de prova (CPs)	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	Traço do concreto	42
4.2	Granulometria da borracha	42
4.3	Massas específicas	45
4.4	Resistência a compressão dos CPs	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

Em meio a crescente tecnológica no mundo contemporâneo e todas suas inovações surpreendentes, cresce também a preocupação com o meio ambiente e toda sua problemática. Apesar da modernização, a questão dos resíduos continua sendo um problema, com o descarte inadequado prejudicando o meio ambiente de diversas maneiras. Por isso, é essencial discutir a utilização dos recursos naturais e a forma como o lixo é descartado na natureza. Para isso, existem ações que atualmente estão em curso; um exemplo são as resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

A reciclagem é um dos meios mais adequados para a problemática citada acima; como de fato já existem várias soluções tecnológicas para a reutilização desse material descartado, transformando-o em um produto pronto para ser comercializado. À exemplo disto temos o papel higiênico, embalagens de alumínio, dentre outros.

Apesar desses avanços, o rápido desenvolvimento da sociedade contemporânea gera uma enorme quantidade de resíduos que alteram a paisagem e poluem elementos que são imprescindíveis para o ser humano.

A construção civil é responsável por grande parte do lixo gerado nos centros urbanos (BATISTA, 2014). Dito isto, é possível observar diversas formas de reciclagens de resíduos dentro da construção civil. Uma delas é através do uso de corpo de prova de concreto, onde o mesmo seria triturado e os seus elementos usados como agregado para compor o concreto final. Outros produtos, como a sílica ativa e a borracha também são capazes de serem reutilizados dentro da construção civil. Vários centros de pesquisas ainda estudam a utilização de outros resíduos em argamassas e concretos (SANTOS, 2005).

Um dos produtos de maior consumo mundial e que tem uma das decomposições mais difíceis na natureza é o pneu. Quando chegam ao limite de sua vida útil, são destinados a aterros sanitários, onde podem permanecer por mais de 500 anos até sua decomposição por completo. Por isso, a reciclagem torna-se imprescindível para atribuir um novo destino a esse material. Uma das formas mais eficaz de reciclagem do pneu é a recauchutagem, pois pode prolongar a sua vida útil. Embora esse processo gere resíduos, como o pó da borracha, o uso da borracha de pneu moída na construção civil vem sendo estudada há alguns anos a fim de verificar sua viabilidade (ALBUQUERQUE; ANDRADE, 2023). Por isso, a recauchutagem se

torna viável e importante, pois o resíduo gerado por ela pode também ser reaproveitado na construção civil.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

: Analisar a influência do pó de borracha de pneu como substituto parcial do agregado miúdo com o resíduo de corpo de prova de concreto como agregado graúdo nas propriedades dos concretos no estado fresco e endurecido.

1.1.2 Específicos

- Analisar a influência do pó de borracha na resistência à compressão do concreto com agregado graúdo de resíduo de corpos de prova.
- Analisar a influência do pó de borracha na absorção de água do concreto com agregado graúdo de resíduo de corpos de prova.
- Verificar a influência conjunta dos 2 resíduos nas propriedades do concreto.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Neste tópico serão abordados os estudos relacionados à utilização da borracha proveniente de pneus e do agregado graúdo reciclado no concreto.

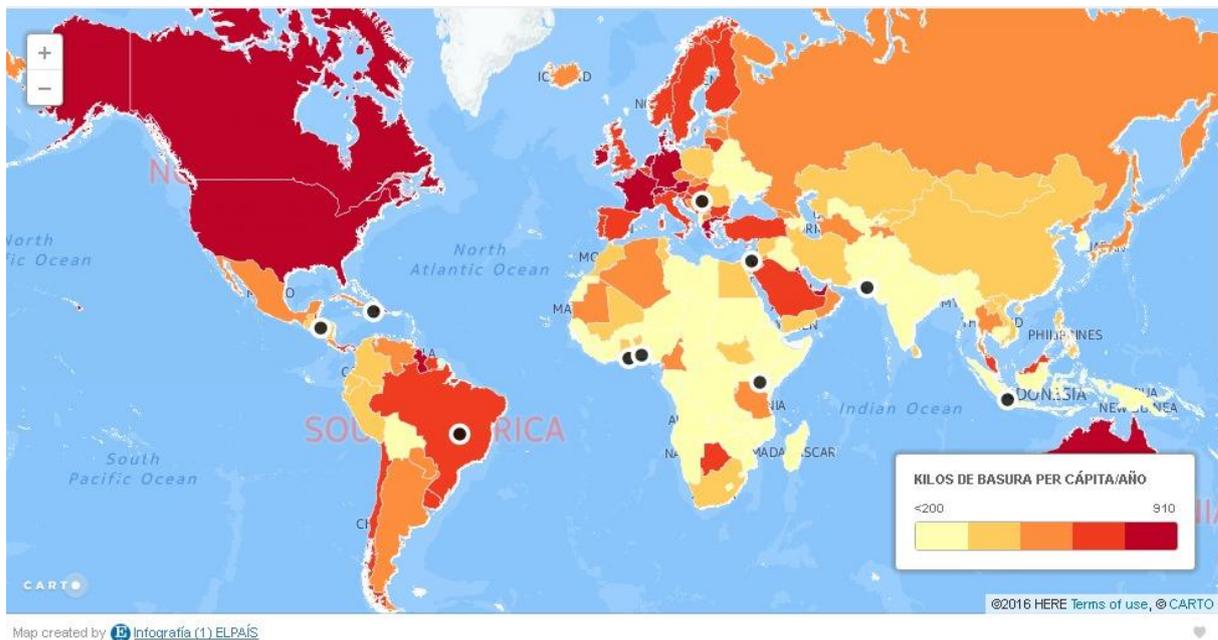
2.1 A geração de resíduo mundial

Um estudo da *International Solid Waste Association* (ISWA), uma organização sem fins lucrativos que reúne profissionais do setor de resíduos sólidos, prevê que a geração mundial de lixo chegará a 3,4 bilhões de toneladas, por ano, até 2050.

Em 2016, eram cerca de 2 bilhões de toneladas/ano produzidas. Ou seja, pode haver um aumento de 70% nos descartes (CNN BRASIL, 2022).

Na figura 1 pode-se observar o mapa da produção de lixo por pessoa em cada país do mundo.

Figura 1 - Produção de lixo por pessoa ao ano em cada país



Fonte: IHU (2016)

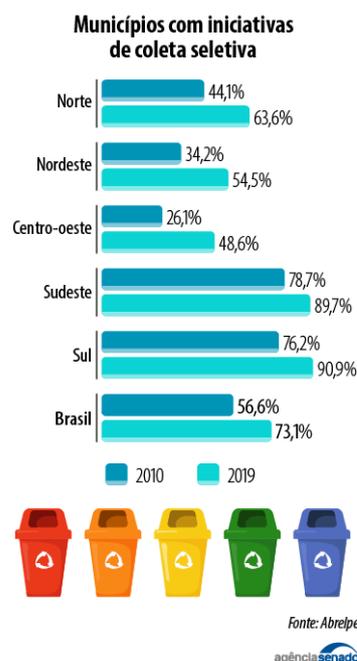
Observando a figura 1 nota-se que quanto mais escura a cor do país, maior é a produção de lixo por pessoa. O Brasil apresenta a segunda tonalidade mais escura

do gráfico, o que enfatiza o grande problema com a produção de lixo que se tem no país, sendo um dos maiores produtores de lixo do mundo.

Os dez pontos pretos indicados no mapa representam alguns dos maiores lixões do mundo (IHU, 2016). De acordo com a pesquisa da ISWA (2022), o Brasil é o maior produtor de resíduos urbanos da América Latina e Caribe, respondendo por cerca de 40% do total de resíduos. Segundo a Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), estimasse que a geração anual de resíduos no país chegará a 100 milhões de toneladas/ano até 2030.

Segundo a ABRELPE (2022), na lista dos principais resíduos no Brasil, o primeiro lugar é dos orgânicos. Eles representam cerca de 45% de tudo que é produzido no país, seguido pelos os plásticos, que são cerca de 17%. Diante da perspectiva da ampliação de lixo no mundo, um dos principais pontos destacados pela pesquisa é a gestão dos materiais após o descarte. No Brasil, a cobertura de coleta abrange 92,2% dos resíduos, o que significa que 6,4 milhões de toneladas por ano, sequer são retiradas dos pontos de geração. Esse volume poderia encher três mil piscinas olímpicas (CNN BRASIL, 2022). É possível observar a produção de resíduos por região do Brasil na figura 2.

Figura 2 – Produção de resíduos em cada região do Brasil



Fonte: Agência Senado (2021)

– onde um item é usado apenas para outra função – e da redução – que envolve a redução do consumo de determinados produtos (ECLYCLE, 2023).

Quanto ao conceito, a imagem é composta por setas que representam as diferentes etapas do processo de reciclagem. São elas: a primeira seta refere-se à indústria em que o produto é produzido; a segunda seta aponta para o consumidor que utiliza o produto, enquanto a terceira seta refere-se à reciclagem, que é o reaproveitamento de materiais que já foram utilizados, transformando-os novamente em matéria-prima (LAR PLÁSTICOS, 2020).

O símbolo da reciclagem nasceu no Dia da Terra (22 de abril de 1970) na cidade de Chicago (EUA) em uma competição organizada pela grande produtora de papel reciclado *American Container Company* (LAR PLÁSTICOS, 2020).

Naquele ano, a empresa de reciclagem de papel queria divulgar seus produtos e serviços de forma mais eficaz. A ideia era organizar um concurso para escolher o logotipo que melhor representasse a reciclagem. Além disso, o concurso visou conscientizar estudantes de arte, design e arquitetura sobre as questões ambientais.

Gary Anderson, então um estudante de Arquitetura e Ciências Sociais da USC, de 23 anos, venceu a competição com uma imagem do símbolo universal de reciclagem que ainda está em uso hoje (LAR PLÁSTICOS, 2020). A imagem pode ser observada na figura 4.

Figura 4 – Símbolo da reciclagem



Fonte: Lar Plásticos (2020)

2.2.1 A importância da reciclagem

O processo de reciclagem afeta diretamente o meio ambiente, reintroduzindo itens com potencial de reaproveitamento que seriam descartados na cadeia produtiva. A reciclagem dá nova vida aos resíduos, evitando desperdícios, impactos ambientais e problemas de saúde. Por meio da reciclagem, os materiais que são jogados na lixeira podem ser transformados no mesmo produto ou transformados em algo com outros usos (RECICLASAMPA, 2020).

A figura 5 apresenta alguns benefícios que se alcança com o processo de reciclagem.

Figura 5 – Guia prático de reciclagem



Fonte: Neo Energia (2020)

O processo de reciclagem é a maneira mais limpa e eficiente de descartar resíduos. Na frente social, é fundamental apoiar os milhões de catadores que dependem da venda desses recicláveis para ganhar a vida e sustentar suas famílias (RECICLASAMPA, 2020).

2.2.2 A coleta seletiva

Fundamental para a reciclagem, a coleta seletiva é a retirada dos resíduos sólidos separados previamente, a partir de sua composição. Em linhas gerais, divide-se em orgânicos e inorgânicos e seus tipos de materiais: vidro, papel, alumínio, óleo vegetal e eletrônicos, como pilhas e celulares (NEO ENERGIA, 2020).

O Brasil conta com uma Política Nacional de Resíduos Sólidos e recicla apenas 2,1% do total do material coletados. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), esse percentual se mantém há mais de três anos, devido à dificuldade em avançar na coleta seletiva. A meta é que altere até 2040, quando pelo menos 72,6% da população terá acesso à coleta seletiva e 20% do material coletado seja reciclado, de acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (NEO ENERGIA, 2020). A figura 6 apresenta a coleta seletiva e indica onde deve ser descartado cada tipo de produto pelo material de sua fabricação.

Figura 6 – Coleta seletiva



Fonte: Toda Matéria (2023)

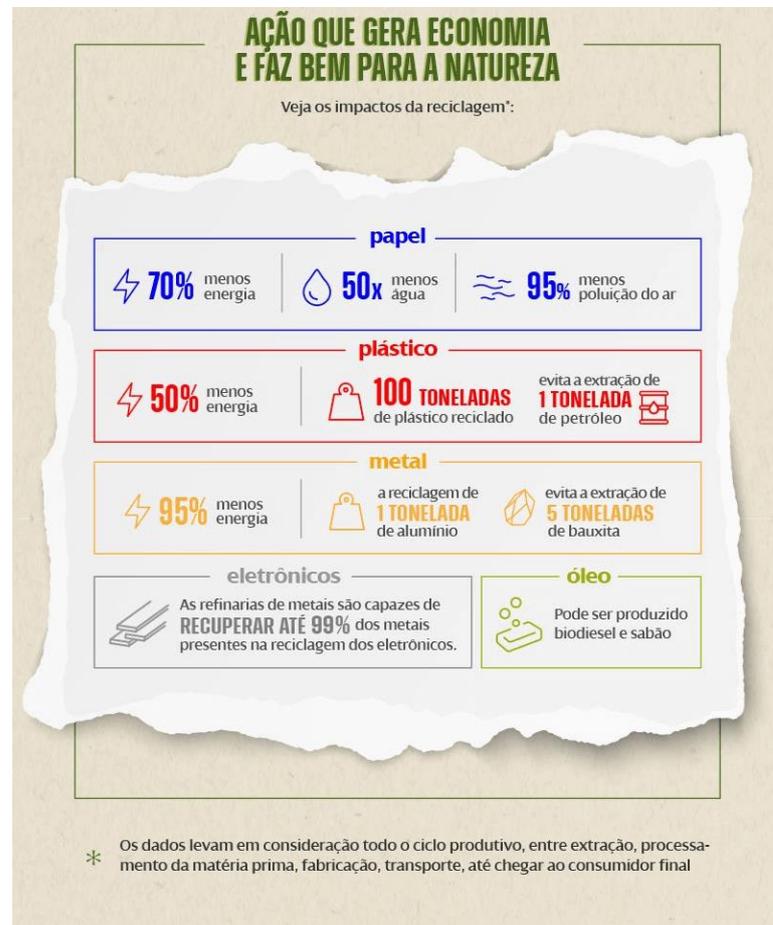
A função das lixeiras de diferentes cores é facilitar memorização por parte das pessoas. O uso de tons diferentes é uma prática já consolidada no cenário internacional. Confira as cores e seus respectivos materiais:

- AZUL: papel e papelão;

- VERMELHO: plástico;
- VERDE: vidro;
- AMARELO: metal;
- PRETO: madeira;
- LARANJA: resíduos perigosos;
- BRANCO: resíduos hospitalares e de serviços de saúde;
- ROXO: resíduos radioativos;
- MARROM: resíduos orgânicos;
- CINZA: resíduo geral não reciclável ou misturado, ou contaminado não passível de separação (NEO ENERGIA, 2020).

A figura 7 apresenta a importância da reciclagem por material

Figura 7 – Ações que geram economia e fazem bem para a natureza



Fonte: Neo Energia (2020)

2.3 Reciclagem na construção civil

Nenhuma sociedade poderá atingir o desenvolvimento sustentável sem que a construção civil, que lhe dá suporte, passe por profundas transformações (DE PAIVA, 2023).

A cadeia produtiva da construção civil, também denominada *construbusiness*, apresenta importantes impactos ambientais em todas as etapas do seu processo, tais como: extração de matérias-primas, produção de materiais, construção, uso e demolição (PAIVA; RIBEIRO, 2023).

Esse grande impacto decorre de diferentes fatores, entre os quais o enorme peso da construção civil na economia. No Brasil, o *construbusiness* corresponde a 14% da economia. Qualquer atividade humana necessita de um ambiente adequadamente construído para sua operação e os produtos da construção civil são sempre de grandes dimensões. A construção civil é um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais. Estima-se que a construção civil utiliza algo entre 20% e 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade (PAIVA; RIBEIRO, 2023).

A figura 8 mostra um exemplo claro da geração de resíduos em uma construção civil.

Figura 8 – Resíduos na construção civil



Fonte: Pensamento Verde (2014)

Muitas vezes, os resíduos da construção civil são destinados de forma inadequada, depositados em terrenos baldios, vias públicas ou em áreas de

preservação ambiental, causando grandes impactos para o meio ambiente e qualidade de vida da população (PENSAMENTO VERDE, 2014).

A reutilização e reciclagem dos resíduos da construção civil como matéria-prima traz inúmeros benefícios econômicos e ambientais, pois minimizam a extração de recursos naturais, cujas reservas estão, em grande maioria, escassas, além de reduzir os níveis de poluição atmosférica elevados, em função da extração, processamento e transporte. Esse processo, conseqüentemente, possui um custo menor (PENSAMENTO VERDE, 2014).

O reaproveitamento dos resíduos da construção civil pode ser feito dentro ou fora dos canteiros de obras, onde materiais como argamassa, concreto, material cerâmico, madeira, vidro e componentes de vedações, que possuem alto poder de reciclagem, são submetidos à trituração, em que ocorre a quebra dos resíduos em pedaços menores (PENSAMENTO VERDE, 2014).

Na figura 9 pode-se ver o processo de separação dos resíduos para o encaminhamento dos mesmos para a reciclagem/reutilização.

Figura 9 – Processo de separação dos resíduos



Fonte: Pensamento Verde (2014)

2.4 Corpo de prova de concreto

O concreto é um elemento imprescindível na construção de prédios, rodovias, pontes, entre tantas outras construções. Entretanto, para toda e qualquer construção

que use o concreto, é necessário atestar que o mesmo apresente o desempenho esperado em projeto.

O meio mais comum e prático de averiguar e garantir a resistência esperada do concreto é através do ensaio a compressão do corpo de prova cilíndrico. Para tal, é necessário, em toda concretagem durante a obra, a retirada de amostras de corpo de prova para realizar os devidos testes, como visto na figura 10.

Figura 10 – Corpo de prova de concreto



Fonte: Autor (2023)

A NBR 16886 (ABNT, 2020) especifica que o volume da amostra a ser retirado para a execução de corpo de prova (CP) não deve ser menos que 1,5 vez a quantidade necessária para realizar os ensaios. Sendo que para o ensaio de resistência a quantidade mínima é e 30 litros de concreto. Isso para um país onde o método de construção predominante é através do concreto armado, tendo uma estimativa de que cerca de 51 milhões de metros cúbicos de concreto é produzido por ano, no Brasil, torna-se uma quantidade relativamente significativa em relação a produção de corpo de prova para teste de todo esse concreto (ABCP, 2013).

2.4.1 Resíduo do concreto

A resolução 307 do CONAMA (LEGISWEB, 2023) classifica que os resíduos de construção civil são aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de construção civil. Sendo que a mesma indica que o concreto em geral é uma forma de resíduo da construção civil.

Sabendo disto e tendo em vista que o Brasil é um país em que se produz e usa-se muito o concreto com função estrutural, deve-se testar o mesmo em relação a sua capacidade de compressão. Para isso, é muito comum encontrar laboratórios com equipamentos e equipes qualificadas para a execução dos testes. A grande produção de concreto implica em uma grande produção de corpos de prova de concreto, que por sua vez, após o teste de compressão não tem mais utilidade, tornando-se um grande problema para o laboratório que tenha que fazer o descarte desse resíduo.

Tendo em vista toda problemática do descarte do concreto, é possível visualizar a sua significância quando se compara com a quantidade de resíduo de outros materiais da construção civil, como pode-se ver na figura 11.

Figura 11 – Fonte geradora de resíduos na construção civil

Componentes	Trabalhos rodoviários	Escavações	Sobras de demolições	Obras diversas	Sobras de limpeza
Concreto	48	6,1	54,3	17,5	18,4
Tijolo	-	0,3	6,3	12,0	5,0
Areia	4,6	9,6	1,4	3,3	1,7
Solo, poeira, lama	16,8	48,9	11,9	16,1	30,5
Rocha	7,0	32,5	11,4	23,1	23,9
Asfalto	23,6	-	1,6	1	0,1
Metais	-	0,5	3,4	6,1	4,4
Madeira	0,1	1,1	1,6	2,7	3,5
Papel/material orgânico	-	1,0	1,6	2,7	3,5
Outros	-	-	0,9	0,9	2,0

Fonte: Levy (1997) *apud* Santos (2009)

Visto que cerca de 2% a 3% do que é produzido em uma fábrica de concreto usinado acaba sendo descartado como resíduo, sendo que a produção anual gira em torno de 51 milhões de m³ de concreto, teríamos cerca de 1 milhão de m³ de resíduo de concreto por ano em todo o Brasil (ABCP, 2013).

2.5 A obtenção dos resíduos do corpo de prova

Enquanto parece repetitivo demonstrar o quão negativos são os impactos dos resíduos de construção e demolição para o meio ambiente, insistir em práticas que os minimizem é uma atividade obrigatória dos envolvidos com a construção civil.

2.5.1 Equipamentos de trituração dos resíduos

Equipamento britador de impacto:

O britador é um equipamento onde se é utilizado para fazer o processo de britagem do entulho, técnica eficaz que tritura os materiais decorrentes de obras, contribuindo com o gerenciamento de resíduos e a tão necessária reciclagem de entulho (CGEA, 2023).

O processo de britagem de material de demolição ocorre em uma usina de reciclagem de entulho e se inicia com a triagem e separação dos resíduos a serem britados, que em seguida são triturados por um britador. Durante a técnica de britagem de entulho, há uma remoção de materiais finos, realizada por uma grelha presente no próprio alimentador. É ela quem seleciona a terra e a conduz para outro equipamento, o transportador de correia, dispondo-a separadamente do restante do sistema, como pode ser visto na figura 12 (CGEA, 2023).

Figura 12 – Equipamento de britagem

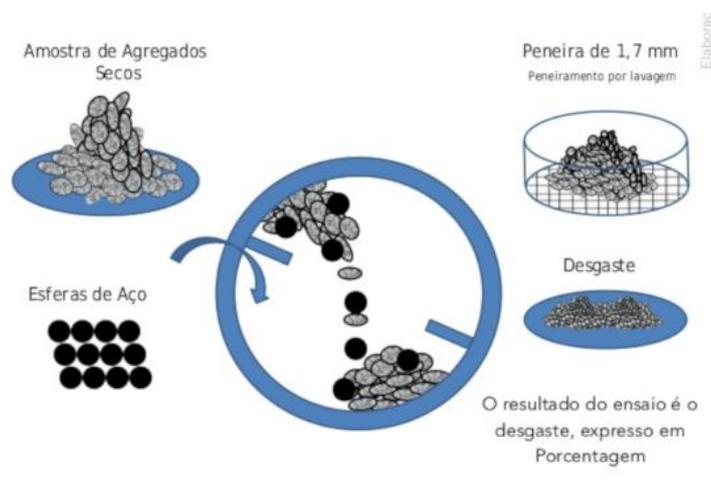


Fonte: CGEA (2023)

Equipamento de Abrasão Los Angeles:

O ensaio Los Angeles é utilizado na caracterização dos agregados graúdos para a construção civil. Nesse teste, o material é colocado junto com esferas de aço em um cilindro de maior diâmetro, que rotaciona sobre seu eixo promovendo a abrasão entre as partículas e as esferas de aço. A alterabilidade do material é medida com base em análises da granulometria dos agregados antes e após o teste, como visto na figura 13 (MINERAJR, 2018).

Figura 13 – Ensaio Los Angeles



Fonte: MineraJr (2018)

O equipamento de Abrasão Los Angeles já foi utilizado em diversos estudos no Brasil, dos quais tinham o intuito de reaproveitamento de resíduos na Engenharia Civil. Dos quais destaca-se os seguintes:

1. **Substituição de agregados naturais por agregado graúdo reciclado e lavado de concreto em concretos betuminosos usinados a quente (MARINHO, 2011).**

Onde pode-se observar os resultados de RT (resistência à tração) e notar que que ela tende a reduzir com o aumento no teor de AGR (agregado graúdo reciclado) na composição das misturas. Contudo, pode-se verificar que, mesmo com 100% de AGR é possível obter valores de RT aceitáveis e pouco diferentes dos resultados da mistura de referência (com 0% de agregado reciclado).

2. **Análise da substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de fibrocimento na produção de argamassa de assentamento (COSTA, 2021).**

Neste trabalho pode se observar que a substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado é possível para produção de argamassa. Contudo, é importante que seja feito um estudo minucioso das propriedades do agregado miúdo reciclado pois suas características são diferentes do agregado miúdo natural e, portanto, podem apresentar comportamentos diferentes nas propriedades reológica e físico-mecânica da argamassa.

3. Análise das propriedades de concreto produzido com agregado miúdo reciclado proveniente de corpos de prova de concreto (RAMOS, 2021).

Neste trabalho, observou-se que é possível fazer a substituição de 100% dos agregados miúdos naturais por AMR (Agregado miúdo reciclado) provenientes de corpos de prova de concreto para produzir concreto com fim estrutural. No entanto, deve-se fazer um estudo detalhado de dosagem do concreto, uma vez que as propriedades do AMR são diferentes das propriedades dos agregados convencionais.

2.6 A borracha do pneu

O pneu é um produto muito utilizado no Brasil, visto a demanda de automóveis existente atualmente. Segundo o IBGE, existem cerca de 111 milhões de automóveis no Brasil; para atender essa demanda de automóveis são produzidos 40 milhões de pneus por ano no país, sendo que, aproximadamente, metade dessa produção é descartada dentro do período de um ano (SEST SENAT, 2022).

Vários países, assim como o Brasil, estão implantando instrumentos que buscam viabilizar o gerenciamento de pneumáticos inservíveis, tendo como exemplo a Diretiva 91/157/CEE, da Comunidade Europeia, e das Normas Diretivas de Aterros na Irlanda, programas que buscam a redução na fonte, com o propósito de recuperar esse produto, assim como a reutilização e reciclagem dos pneumáticos, quando transformado em inservível, por meio de adoção de alternativas tecnológicas existentes e em caráter experimental (ANDRADE, 2023).

A figura 14 apresenta uma das diversas situações em que pneus são descartados de forma inadequada no meio ambiente.

Figura 14 – Pneus descartados inadequadamente



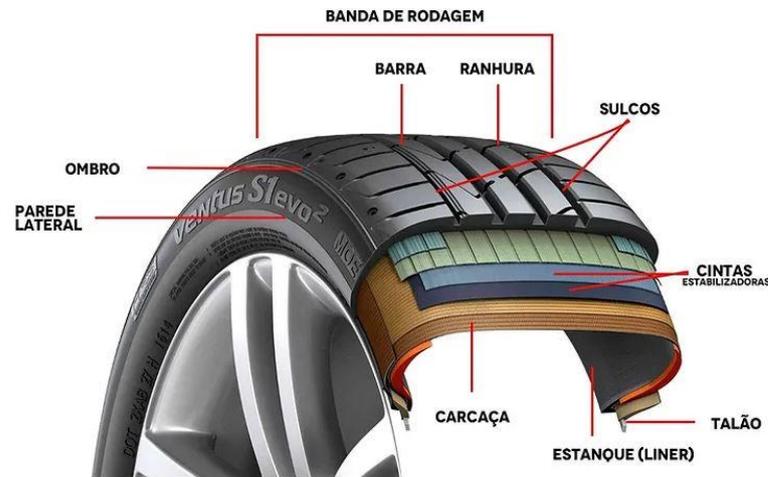
Fonte: Transporta Brasil (2015)

2.6.1 Características do pneu

Quando se observa o pneu externamente, é comum pensar que o mesmo é feito basicamente por borracha. Mas, para produzir um pneu é necessário a junção de algumas matérias primas, como a borracha natural, derivados do petróleo, o aço e alguns produtos químicos. Tendo alguma divergência nas suas proporções para, de acordo com a indicação de utilização do pneu, um exemplo básico é que a proporção para fabricação de um pneu para um carro de passeio é diferente da utilizada para um caminhão (ACHEI PNEUS, 2021).

Para carros de passeio tem-se uma predominância maior da borracha com 41% entre borracha sintética e natural, enquanto teria apenas 10% de aço na composição. Enquanto que para caminhões a porcentagem de borracha cairia para apenas 30%. (ACHEI PNEUS, 2021). A figura 15 apresenta detalhadamente o pneu em suas camadas.

Figura 15 – Corte do Pneu



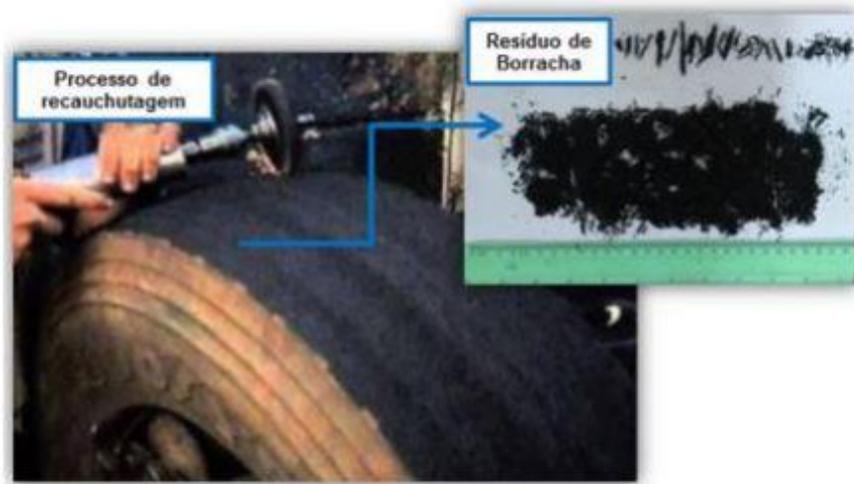
Fonte: Achei pneus (2021)

2.6.2 Processo de descarte e obtenção da borracha do pneu

Segundo o SEST SENAT, ao menos 450 toneladas de pneus são descartadas por ano no Brasil; esse descarte é extremamente importante, pois um pneu demora cerca de 600 anos para se decompor e esses pneus, descartados de forma irresponsável, podem ocasionar problemas de saúde na comunidade, pois os mesmos se tornam ambientes propícios para criadouros do mosquito *Aedes aegypti*, sendo este responsável pela transmissão da dengue, da zika e outras doenças. Por isso é de suma importância o descarte de forma correta e a reutilização desses pneus, para que não venham ocasionar problemas de saúde e ao meio ambiente (SEST SENAT, 2017).

Existem dois processos para a obtenção da borracha do pneu; são eles a trituração e a recauchutagem. No primeiro processo, o pneu é transformado em pedaços granulares através de um triturador apropriado para esse tipo de serviço, sendo que, nesse processo, os pedaços são separados em borracha, aço e fios de nylon. Para a recauchutagem, o pneu é raspado, cimentado e extrusado, onde, a partir disso, ele vai receber uma nova banda de rodagem, que será colada e depois passa pelo processo de vulcanização. Por fim, após todos esses serviços, é possível obter raspas, no caso fibras de borracha que se perdem, como pode ser visto na figura 16 (SILVA; MOUTA, 2019).

Figura 16 – Processo de recauchutagem



Fonte: Silva; Mouta (2019)

2.7 O uso da borracha no concreto

Como já visto, existe um problema muito grande com relação ao descarte do pneu de modo que esse não venha a prejudicar a saúde ou ao meio ambiente. Por isso, é comum se ver experimentos com a utilização de borracha do pneu em outras funções.

Uma forma de reaproveitar essa borracha é utilizando-a como uma substituição ou até mesmo um complemento ao agregado miúdo do concreto. Existem diversos estudos que usam porcentagens diferentes na substituição do agregado miúdo pela borracha, cada um com seus respectivos resultados e considerações. Segundo Oliveira (2014), o concreto sustentável pode ser utilizado em calçadas, ciclovias e em locais onde tenha apenas fluxo de pedestres e que não necessitem de uma resistência a compressão muito alta, e, devido a adição da borracha, o impacto gerado ao caminhar sobre o concreto seja menor que o concreto convencional.

Enquanto Moreira e Fidelis (2009) asseguram que é possível a utilização da borracha de pneu em substituição ao agregado miúdo do concreto com resultado satisfatório, tanto na produção e aplicação da ciclovias, quanto na aplicação do concreto na obra. Como pode-se observar na figura 17.

Figura 17 – Ciclovia de concreto com uso da borracha



Fonte: Moreira e Fidelis (2009)

3 METODOLOGIA

No presente estudo, buscou-se analisar o comportamento do concreto com a substituição do agregado graúdo pelo resíduo do corpo de prova e pela adição da borracha em relação ao agregado miúdo.

3.1 Traço do concreto

A caracterização dos materiais para a desenvolvimento dos traços foram efetuados no Laboratório de Materiais da UFAL Campus do Sertão. Para tal, foram usadas todas as peneiras de granulometria necessárias. De acordo com o método de dosagem da ABCP, são necessários a resistência à compressão do concreto, para validar a sua resistência desejada.

Através da NBR 12655 (ABNT, 2015) é possível determinar a resistência do CP em uma determinada idade pelo fator água/cimento (a/c), onde teríamos uma faixa de 10 MPa a 40 MPa. Foi escolhida uma resistência desejada de 18 MPa.

Como o estudo tem a finalidade de acrescentar a borracha em relação ao agregado miúdo nas proporções de 10%, 15% e 20% e substituir a brita integralmente pelo resíduo do corpo de prova, então foram feitas 3 amostras contendo 6 corpos de provas cada, sendo que para uma amostra não foi feito o acréscimo da borracha em relação ao agregado miúdo, logo ficamos com 4 amostras de 6 corpos de provas cada.

O processo de obtenção do resíduo do corpo de prova se deu pelos seguintes passos: primeiro é feito a quebra dos corpos de prova em fragmentos com uma marreta; logo após, esses fragmentos foram colocados no tambor do equipamento de Abrasão Los Angeles para serem triturados; em seguida, fez-se o peneiramento com a peneira de 4,8 mm. O material que passou nessa peneira foi utilizado para outros estudos do laboratório da UFAL, enquanto que com o material que ficou retido fez-se mais um peneiramento com a peneira de 25 mm – apenas a fração de resíduo que passou pela peneira de 25 mm foi utilizado na pesquisa e, o que ficou retido, foi descartado.

3.2 Moldagem dos corpos de provas (CPs)

Para cada amostra foram usados 6 moldes de corpos de prova cilíndricos, limpos e untados internamente com óleo queimado de motor, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016). Após serem limpos e untado, como mostra a figura 18, os moldes foram posicionados em fileira, afim de facilitar a aplicação do concreto no mesmo.

Figura 18 – Moldes untados



Fonte: Autor (2023)

Após definir a quantidade correta de materiais a serem utilizados, foram pesados e separados todos materiais para moldagem dos corpos de prova das 4 amostras, como pode ser visto na figura 19.

Figura 19 – Material utilizado



Fonte: Autor (2023)

Com o material pesado e separado, fez-se a mistura na betoneira, onde inicialmente colocou-se o agregado miúdo junto com o cimento para se ter uma homogeneização e, depois, complementando com o agregado graúdo. Após adicionar o mesmo e deixar, até ele se homogeneizar, adiciona-se a água de forma gradativa até a mistura está totalmente pronta. A figura 20 mostra o processo de mistura dos materiais, conseqüentemente do preparo do concreto.

Figura 20 – Preparo do concreto em betoneira



Fonte: Autor (2023)

É importante salientar que é preciso parar a betoneira para verificar a homogeneização do concreto de acordo com a quantidade de água que vai sendo adicionada.

Após o fim do preparo de amostra foi feito o *slump test* do concreto de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020), onde se testa a trabalhabilidade do mesmo. Para tal, utiliza-se o molde tronco-cônico com a haste de adensamento. O procedimento é feito com o preenchimento do tronco-cônico em três camadas iguais; para cada camada são dados 25 golpes com a haste para a sua compactação. Por fim, retira-se o tronco-cônico e deixa o concreto descer para medir o abatimento do mesmo, como pode ser visto na figura 21.

Figura 21 – Ensaio de Slump Test



Fonte: Escola Engenharia (2019)

Para a moldagem dos corpos de provas, a norma NBR 5738 (ABNT, 2016) torna claro que o preenchimento do concreto nos moldes, o adensamento deve seguir os requisitos da figura 22:

Figura 22 – Número de camadas para moldagem dos corpos de prova

Tipo de corpo de prova	Dimensão básica (d) mm	Número de camadas em função do tipo de adensamento		Número de golpes para adensamento manual
		Mecânico	Manual	
Cilíndrico	100	1	2	12
	150	2	3	25
	200	2	4	50
	250	3	5	75
	300	3	6	100
	450	5	–	–
Prismático	100	1	1	75
	150	1	2	75
	250	2	3	200
	450 ^b	3	–	–

^a Para concretos com abatimento superior a 160 mm, a quantidade de camadas deve ser reduzida à metade da estabelecida nesta Tabela. Caso o número de camadas resulte fracionário, arredondar para o inteiro superior mais próximo.

^b No caso de dimensão básica de 450 mm, somente é permitido adensamento mecânico.

Fonte: ABNT NBR 5738 (2016)

Como o adensamento foi manual, as moldagens dos corpos de prova foram feitas em duas camadas aproximadamente iguais, onde cada camada recebe 12 golpes uniformes e homoganeamente distribuídos. Logo, seguiu-se a recomendação ao máximo possível: ao final dos 12 golpes, retirou-se o excesso, e deu-se umas pancadas nas laterais do molde para a retirada de possíveis vazios.

3.3 Armazenamento e cura dos corpos de prova (CPs)

Após a moldagem do CPs, os mesmos foram armazenados em um local onde não houvesse a possibilidade de ter interferências que viessem a causar danos aos CPs. A Figura 23 mostra os CPs nos moldes.

Figura 23 – Armazenamento dos CPs



Fonte: Autor (2023)

Após a moldagem, esperou-se 24 horas para o desmolde. Em sequência, os corpos de prova foram colocados submersos em água saturada de cal, onde ficaram em armazenamento aguardando o momento de se fazer os devidos ensaios, como é visto na figura 24.

Figura 24 – Processo de cura dos CPs



Fonte: Autor (2023)

3.4 Ensaio de determinação da absorção da água, índices de vazios e massa específica dos corpos de prova (CPs)

Dado 25 dias de cura do corpo de prova, fez-se os ensaios para determinar a sua absorção de água, o índice de vazios e a massa específica, de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009).

Para tal, o primeiro passo foi retirar a amostra da sua cura e levá-la à estufa em uma temperatura de aproximadamente 105 °C, durante um período de 72 h. Após esse tempo na estufa determinou-se a massa seca da amostra (m_s).

Em seguida, foi feita a imersão da amostra novamente em água a uma temperatura de aproximadamente 23 °C, deixando-a por 72 h nessa condição. Completada a sua saturação, levou-se a amostra em banho maria, com água em ebulição, por um período de 5 h. Após isso, deixou-se a água esfriar a uma temperatura de aproximadamente 23°C, e, em seguida, determinou-se a massa da amostra submersa (m_i) com o auxílio da balança hidrostática. Definida sua massa, retirou-se da água e enxugou-se a amostra com um pano úmido, levando a mesma a balança e determinou-se a sua massa saturada (m_{sat}).

A figura 25 apresenta uma amostra de corpo de prova em processo de banho maria para em seguida definir suas massas.

Figura 25 – Processo de banho maria



Fonte: Autor (2023)

3.5 Ensaio à compressão dos corpos de prova (CPs)

Após a determinação das densidades do CPs foi feito o rompimento dos mesmos, seguindo à risca a recomendação da NBR 5739 (ABNT, 2018).

Os ensaios de compressão foram feitos quando os CPs atingiram 28 dias de cura. A figura 26 apresenta o processo de rompimento do corpo de prova na prensa.

Figura 26 – Processo de rompimento dos CPs



Fonte: Autor (2023)

Para o rompimento foi feita a retificação dos corpos de prova, fazendo assim com que a face dos corpos de prova estivesse nivelada, tendo uma aplicação de força na base do corpo de prova fosse distribuída por igual, não gerando variações nas tensões. A figura 27 mostra o corpo de prova após o seu rompimento.

Figura 27 – Corpo de prova após o seu rompimento



Fonte: Autor (2023)

Tendo sido todas as amostras rompidas com 28 dias e com a mesma prensa, igualmente calibrada pela empresa responsável.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Traço do concreto

O traço do concreto foi definido através da NBR 12655 (ABNT, 2015), atendendo as condições da mesma. Foi determinada uma resistência de 18 MPa para o concreto de referência. Assim, encontrou-se o seguinte traço para o concreto: 1:2,372:3,291:0,62, sendo cimento, areia, brita e água, respectivamente. A partir desse traço foi possível definir a quantidade de material em massa para a produção do concreto, como mostra a tabela 1.

Tabela 1 – Materiais em massa necessários para 1 m³ de concreto

Cimento CP II Z (kg)	AMN* (kg)	AGR* (kg)	Água (L)
323	766	1.063	200

Fonte: Autor (2023)

*AMN – Agregado Miúdo Natural

*AGR – Agregado Graúdo Reciclado

A tabela 1 demonstra a quantidade em massa necessária para a produção de 1 m³ de concreto.

4.2 Granulometria da borracha

Para a utilização da borracha como acréscimo ao agregado miúdo foi de grande importância fazer o teste de granulometria da mesma, atestando assim a sua capacidade de utilização em relação a areia. A tabela 2 apresenta os resultados do teste de granulometria da borracha.

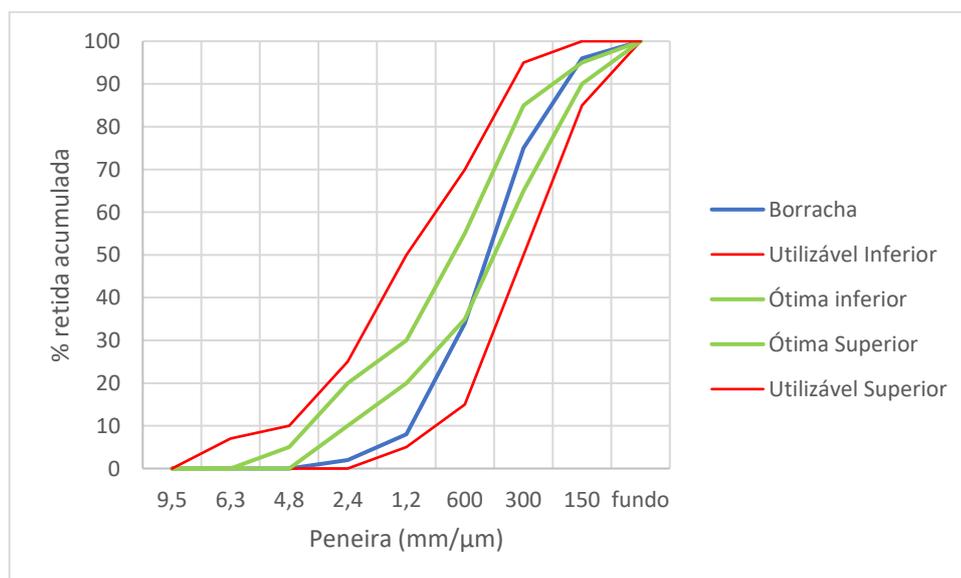
Tabela 2 – Granulometria da borracha

Abertura das peneiras	% Retido
6,3 mm	0
4,8 mm	1
2,4 mm	8
1,2 mm	9
600 μm	25
300 μm	39
150 μm	14
Fundo	4
Dimensão máxima característica	4,8 mm
Módulo de Finura	2,15
Classificação granulométrica	Utilizável para concreto

Fonte: Autor (2023)

Dado o grau de porcentagem de borracha retida em relação as aberturas das peneiras são notadas que a granulometria da borracha se adequa bem a granulometria da areia padrão utilizada para fabricação de concreto. Logo, definiu-se que a borracha pode ser acrescentada ao concreto sem nenhum problema em relação da granulometria do agregado miúdo. O gráfico da figura 28 apresenta a curva granulométrica da borracha.

Figura 28 – Gráfico da granulometria da borracha



Fonte: Autor (2023)

A tabela 3 apresenta a granulometria da areia, onde pode-se comparar com a granulometria da borracha.

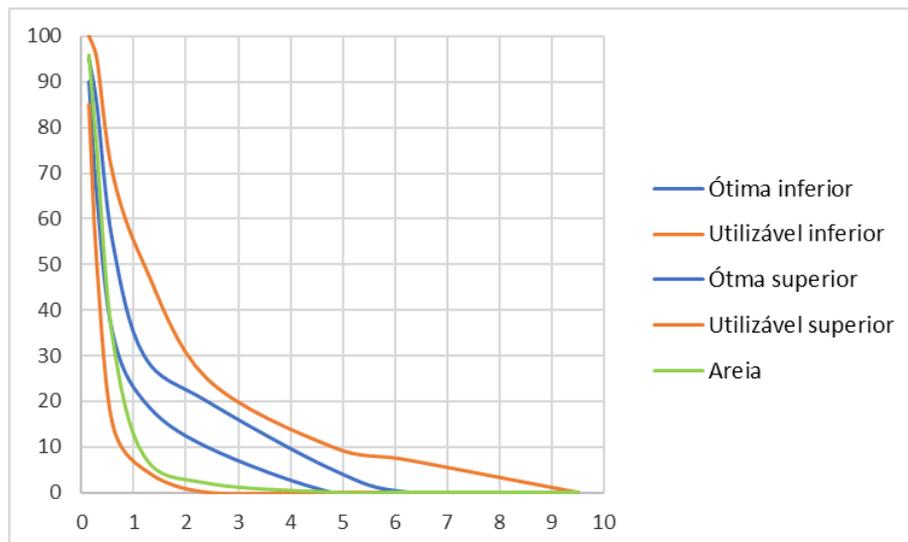
Tabela 3 - Granulometria da areia

Abertura das peneiras	% Retido
6,3 mm	0
4,8 mm	1
2,4 mm	7
1,2 mm	16
600 μm	27
300 μm	28
150 μm	16
Fundo	1
Dimensão máxima característica	4,8 mm
Módulo de Finura	2,58
Classificação granulométrica	Utilizável para concreto

Fonte: Autor (2023)

O gráfico da figura 29 apresenta a curva granulométrica da areia.

Figura 29 – Gráfico da granulometria da areia



Fonte: Autor (2023)

4.3 Massas específicas

Para se obter o resultado das massas específicas seguiu-se a NBR 9778 (ABNT, 2005). A partir dos ensaios executados, foi possível encontrar os resultados das massas de cada amostra.

Tendo em vista que as amostras foram separadas em 01, 02, 03 e 04, onde percentagem de borracha em cada amostra eram de 0%, 10%, 15% e 20% respectivamente, em relação à massa de agregado miúdo.

A tabela 4 apresenta os resultados das massas específicas da amostra 01, no qual pode-se analisar os índices da amostra com 0% de acréscimo da borracha.

Tabela 4 – Resultados das massas específicas da amostra 01

Amostra 01									
Porcentagem de borracha no concreto	0%								
CP	1	2	3	4	5	6			
Massa seca (g)	3073	3105	2999	3032	3085	3028			
Massa submersa (g)	1238	1382	1387	1763	1782	1760			
Massa saturada (g)	3350	3383	3270	3310	3374	3302	Médias	DP	CV (%)
Absorção (%)	9,01	8,95	9,04	9,17	9,37	9,05	9,10	0,15	1,60
Índice de vazios (%)	13,12	13,89	14,39	17,97	18,15	17,77	15,88	2,32	14,60
Massa específica seca (kg/m ³)	1455	1552	1593	1960	1938	1964	1743,47	234,87	13,50
Massa específica saturada (kg/m ³)	1586	1691	1737	2140	2119	2141	1902,29	257,98	13,60
Massa específica real (kg/m ³)	1675	1802	1860	2389	2368	2388	2080,35	335,56	16,10

Fonte: Autor (2023)

Enquanto a tabela 5 apresenta os resultados referentes a amostra 02.

Tabela 5 – Resultados das massas específicas da amostra 02

Amostra 02									
Porcentagem de borracha no concreto	10%								
CP	1	2	3	4	5	6			
Massa seca (g)	2589	2523	2570	2460	2671	2630			
Massa submersa (g)	1096	990	1098	1276	887	793			
Massa saturada (g)	2847	2801	2839	2814	2929	2900	Médias	DP	CV (%)
Absorção (%)	9,97	11,02	10,47	14,39	9,66	10,27	10,96	1,74	15,90
Índice de vazios (%)	14,73	15,35	15,45	23,02	12,63	12,81	15,67	3,80	24,30
Massa específica seca (kg/m³)	1479	1393	1476	1599	1308	1248	1417,27	127,69	9,00
Massa específica saturada (kg/m³)	1626	1547	1631	1830	1434	1376	1573,94	161,60	10,30
Massa específica real (kg/m³)	1734	1646	1746	2078	1497	1432	1688,73	228,57	13,50

Fonte: Autor (2023)

Pode-se notar uma diferença na absorção da amostra 01 para a amostra 02, mesmo que com um grau não muito elevado. Mas o concreto com a adição da borracha se mostra mais susceptível a absorção em relação ao concreto sem a borracha.

A tabela 6 apresenta os resultados da amostra 03, onde temos o concreto com a adição de 15% da borracha em relação ao agregado miúdo.

Tabela 6 – Resultados das massas específicas da amostra 03

Amostra 03									
Porcentagem de borracha no concreto	15%								
CP	1	2	3	4	5	6			
Massa seca (g)	2482	2467	2489	2720	2377	2480			
Massa submersa (g)	1013	1016	1287	1123	762	830			
Massa saturada (g)	2800	2772	2835	3053	2633	2810	Médias	DP	CV (%)
Absorção (%)	12,81	12,36	13,90	12,24	10,77	13,31	12,57	1,07	8,50
Índice de vazios (%)	17,80	17,37	22,35	17,25	13,68	16,67	17,52	2,79	15,90
Massa específica seca (kg/m³)	1389	1405	1608	1409	1270	1253	1389,00	127,48	9,20
Massa específica saturada (kg/m³)	1567	1579	1831	1582	1407	1419	1564,20	153,35	9,80
Massa específica real (kg/m³)	1690	1700	2071	1703	1472	1503	1689,76	213,44	12,60

Fonte: Autor (2023)

A amostra 03, com um percentual de borracha maior se mostra ainda mais susceptível a absorção, o que nos mostra uma certa tendência.

A tabela 7 apresenta os resultados da amostra 04, onde temos o concreto com a adição de 20% da borracha em relação ao agregado miúdo.

Tabela 7 – Resultados das massas específicas da amostra 04

Amostra 04									
Porcentagem de borracha no concreto	20%								
CP	1	2	3	4	5	6			
Massa seca (g)	2626	2597	2671	2447	2618	2598			
Massa submersa (g)	991	1075	1118	1082	1094	1097			
Massa saturada (g)	2932	2917	2995	2779	2963	2944	Médias	DP	CV (%)
Absorção (%)	11,65	12,32	12,13	13,57	13,18	13,32	12,69	0,77	6,00
Índice de vazios (%)	15,77	17,37	17,26	19,56	18,46	18,73	17,86	1,34	7,50
Massa específica seca (kg/m ³)	1353	1410	1423	1442	1401	1407	1405,85	29,81	2,10
Massa específica saturada (kg/m ³)	1511	1584	1596	1638	1585	1594	1584,44	41,23	2,60
Massa específica real (kg/m ³)	1606	1706	1720	1793	1718	1731	1712,28	60,34	3,50

Fonte: Autor (2023)

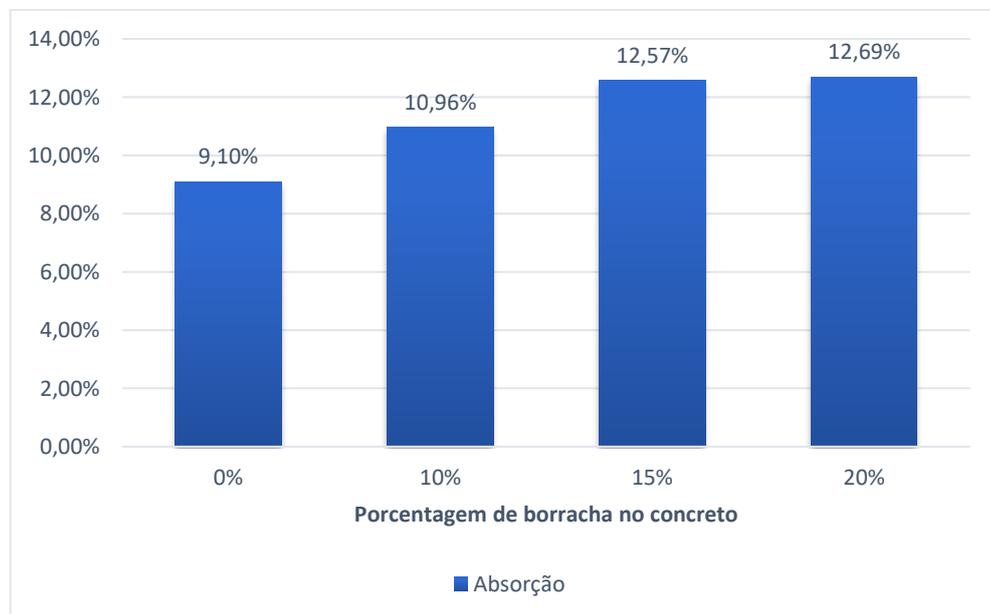
A amostra 04 deixa claro que a partir do momento em que se vai aumentando o percentual da borracha a tendência é que a absorção também aumente, apesar de que em comparação com a amostra 03 o aumento do índice de absorção se torna relativamente baixo.

Se compararmos a amostra 04, que tem o maior percentual de borracha acrescido no concreto com a amostra 01, que não tem acréscimo de borracha, podemos notar uma diferença de 3,59 pontos percentuais entre uma e outra, que já representa uma diferença significativa em se tratando de concreto.

Enquanto se fizermos a mesma comparação, mas agora apenas com as amostras que contém borracha acrescida no concreto, pode-se notar que a diferença cai significativamente. Analisando a amostra 03 com a 02, temos uma diferença de apenas 1,61 pontos percentuais entre si, o que é relativamente pequena visto que a diferença de acréscimo de borracha entre elas é de 5%. Quando partimos para a

análise da amostra 04 com a 03, a discrepância entre uma e outra se torna ainda menor, sendo ela de apenas 0,12 ponto percentual. As amostras apresentam uma tendência de que, quando vai acrescentado a borracha, o índice de absorção aumenta, principalmente em comparação com o concreto convencional. Mas, a partir dos 15%, a quantidade de borracha acrescentada não afetará tanto na absorção, principalmente em comparação com o mesmo concreto apenas com uma porcentagem menor de borracha acrescentada, como pode ser visto na figura 30.

Figura 30 – Gráfico de comparação da absorção



Fonte: Autor (2023)

4.4 Resistência a compressão dos CPs

Após os 28 dias de cura dos CPs e ensaios das massas específicas dos mesmos, foi feito o rompimento das amostras seguindo a NBR 5739 (ABNT, 2018), a partir desse ensaio foi possível obter os resultados da resistência a compressão dos CPs.

A tabela 8 apresenta os resultados das resistências a compressão da amostra 01, no qual pode-se analisar as resistências da amostra com 0% de acréscimo da borracha.

Tabela 8 – Resultados das resistências da amostra 01

AMOSTRA 01		
CPs	Resultado da Prensa (tf)	Resistência (MPa)
CP 01	6,54	8,20
CP 02	6,01	7,50
CP 03	6,68	8,30
CP 04	7,57	9,50
CP 05	6,12	7,60
CP 06	6,08	7,60
Média		8,12
Desvio Padrão		0,74
Coeficiente de variação (%)		9,10

Fonte: Autor (2023)

Enquanto a tabela 9 apresenta os resultados referentes a amostra 02.

Tabela 9 – Resultados das resistências da amostra 02

AMOSTRA 02		
CP's	Resultado da Prensa (tf)	Resistência (MPa)
CP 01	2,78	3,50
CP 02	2,75	3,40
CP 03	2,64	3,30
CP 04	2,64	3,30
CP 05	2,56	3,20
CP 06	2,91	3,60
Média		3,39
Desvio Padrão		0,16
Coeficiente de variação (%)		4,60

Fonte: Autor (2023)

Nota-se uma diferença significativa nas resistências da amostra 01 em relação as da amostra 02: o concreto com a adição da borracha se mostra bem menos resistente em relação ao concreto sem a borracha.

A tabela 10 apresenta os resultados da amostra 03, onde temos o concreto com a adição de 15% da borracha em relação ao agregado miúdo.

Tabela 10 – Resultados das resistências da amostra 03

AMOSTRA 03		
CP's	Resultado da Prensa (tf)	Resistência (MPa)
CP 01	1,92	2,40
CP 02	1,86	2,30
CP 03	2,03	2,50
CP 04	1,96	2,40
CP 05	1,72	2,10
CP 06	2,01	2,50
Média		2,39
Desvio Padrão		0,14
Coeficiente de variação (%)		6,00

Fonte: Autor (2023)

A amostra 03, com um percentual de borracha maior se mostra ainda menos resistente, o que nos apresenta uma certa tendência.

A tabela 11 apresenta os resultados da amostra 04, onde temos o concreto com adição de 20% da borracha em relação ao agregado miúdo.

Tabela 11 – Resultados das resistências da amostra 04

AMOSTRA 04		
CP's	Resultado da Prensa (tf)	Resistência (MPa)
CP 01	1,77	2,20
CP 02	1,62	2,00
CP 03	1,32	1,60
CP 04	1,60	2,00
CP 05	1,70	2,10
CP 06	1,52	1,90
Média		1,98
Desvio Padrão		0,20
Coeficiente de variação (%)		9,90

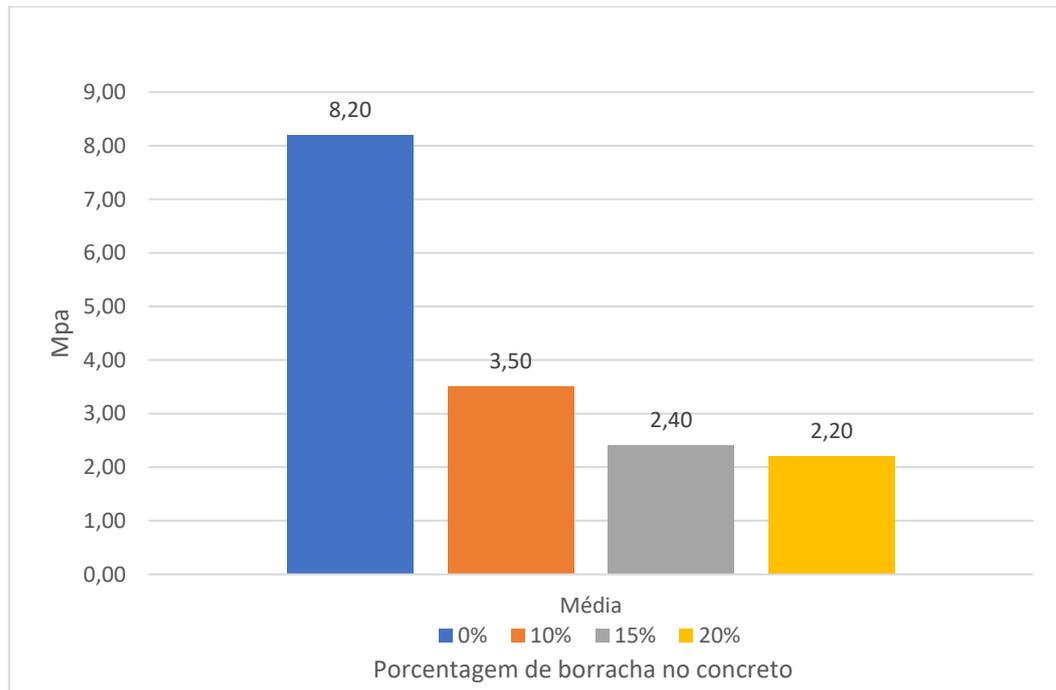
Fonte: Autor (2023)

Analisando a amostra 04, pode-se notar a tendência de que, quanto maior o percentual de borracha no concreto, menor será sua resistência a compressão, mesmo que a diferença de resistência em relação a amostra 03 seja menor.

Observando a amostra 04, que possui o maior percentual de borracha no concreto em relação a amostra 01 que não tem acréscimo de borracha, pode-se notar uma diferença média de 6,14 MPa entre elas. O que representa uma diferença relativamente significativa, quando se trata de resistência a compressão do concreto, podendo fazer com que esse concreto não seja utilizado devido à preocupação com sua baixa resistência.

Se fizermos a mesma comparação, mas agora apenas com as amostras que contém borracha acrescida no concreto, pode-se notar que a diferença cai significativamente. Analisando a amostra 03 com a 02 temos apenas uma diferença média de 1,00 MPa entre si, o que é relativamente pequena visto que a diferença de acréscimo de borracha entre elas é de 5%. Quando partimos para a análise da amostra 04 com a 03 a discrepância entre uma e outra se torna ainda menor, sendo ela de apenas 0,41 MPa. As amostras apresentam uma tendência que, a partir do momento que vai se acrescentando a borracha, a resistência a compressão do concreto cai significativamente, principalmente em comparação com o concreto sem acréscimo da borracha. Mas, a partir dos 15%, a quantidade de borracha acrescida não afetou tanto na resistência do concreto, principalmente em comparação com o mesmo concreto apenas com uma porcentagem menor de borracha acrescida, como pode ser visto na figura 31.

Figura 31 – Gráfico de comparação das amostras 01 a 04



Fonte: Autor (2023)

Um dos fatores que podem ter influenciado na resistência do concreto é a substituição integral da brita pelo resíduo dos corpos de provas. Isto explicaria o fato do concreto com resistência desejada de 18 MPa ter apresentado apenas 8,20 MPa na sua maior média, onde o corpo de prova de maior resistência chegou a apenas 9,50 MPa, basicamente metade da resistência desejada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios deste estudo desmontaram que o pó da borracha utilizado na pesquisa tem a granulometria de um agregado miúdo, no caso a granulometria da areia.

As perdas na resistência à compressão e o aumento na absorção do concreto já eram esperadas. Em relação a resistência, a queda foi maior que o esperado e previstos nas hipóteses, enquanto o índice de absorção se provou exatamente o que se esperava. Um dos fatores para ter uma queda tão acentuada na resistência do concreto, foi o acréscimo do pó da borracha no agregado miúdo, fazendo com que aconteçam alterações na essência do concreto, impactando assim diretamente na resistência do mesmo.

Embora necessite de novos estudos e seja importante que se faça novos experimentos no concreto com a adição da borracha e a substituição da brita pelo resíduo do corpo de prova, o mesmo pode ser aplicado em locais que não tenham função estrutural, como em confecção de ciclovias, calçadas, postes, entre outros.

No ponto de vista ambiental do estudo, o concreto com a adição da borracha e com a substituição do agregado graúdo pelo resíduo do corpo de prova se mostra uma ótima ideia, pois é uma forma consciente de diminuir a quantidade de pneus que são despejados de forma inconsequente no meio ambiente, também se mostra uma excelente solução para a destinação dos corpos de prova que são rompidos pelos laboratórios de engenharia, contribuindo assim com a redução de problemas ambientais e de saúde pública, além de se tornar um material alternativo no mercado da construção civil.

REFERÊNCIAS

A importância da reciclagem de resíduos da construção civil. **PENSAMENTO VERDE**, 2014. Disponível em:

<https://www.pensamentoverde.com.br/reciclagem/importancia-da-reciclagem-de-residuos-da-construcao-civil/>. Acessado em: 18 de janeiro de 2023.

Albuquerque, A.C; Andrade, W.P. **ADIÇÃO DE BORRACHA DE PNEU AO CONCRETO CONVENCIONAL E COMPACTADO COM ROLO**. 2023.

Andrade, Hered de Souza. **PNEUS INSERVÍVEIS: ALTERNATIVAS POSSÍVEIS DE REUTILIZAÇÃO**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 33**: Concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7212**: Execução de concreto dosado em central - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

Aumento da produção de lixo no Brasil requer ação coordenada entre governos e cooperativas de catadores. **AGÊNCIA SENADO**, 2021. Disponível em:

<https://www12.senado.leg.br/noticias/infomaterias/2021/06/aumento-da-producao-de-lixo-no-brasil-requer-acao-coordenada-entre-governos-e-cooperativas-de-catadores>. Acessado em: 05 de março de 2023.

Batista, Daniela Oliveira de Castro; Santos, Lucicledja Soares dos; Wagner, Roberta Afonso Vinhal. **CONCRETO COM ADIÇÃO DE BORRACHA DE PNEU**. Universidade de Uberaba, Uberaba, 2014.

Braz, José Tadeu. **BARREIRAS DE TRÁFEGO I**. Companhia de Engenharia de Tráfego – São Paulo, São Paulo, 2023.

Campanha nacional do SEST SENAT faz alerta sobre a importância da reutilização e reciclagem do material. **SEST SENAT**, 2017. Disponível em: <https://www.sestsenat.org.br/noticia/cerca-de-450-mil-toneladas-de-pneus-sao-descartados-por-ano-no-brasil>. Acessado em: 18 de janeiro de 2023.

Coleta Seletiva. **TODA MATÉRIA**, 2023. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/coleta-seletiva/>. Acessado em: 20 de janeiro de 2023.

Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **MEDITERRÂNEA**, 2023. Disponível em: <http://mediterranea.com.br/noticia-completa/concreto:-as-origens-e-a-evolucao-do-material-construtivo-mais-usado-pelo-homem/112#:~:text=Estima%2Dse%20que%20anualmente%20s%C3%A3o,apenas%20ao%20consumo%20de%20%C3%A1gua>. Acessado em: 10 de janeiro de 2023.

Costa, Karla Juliana Cordeiro. **ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR RESÍDUO DE FIBROCIMENTO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO**. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2021.

David, Wallace; Marco, Gerson de. **VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE CONCRETO BORRACHA NA CONSTRUÇÃO CIVIL – UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**. Revista Científica Multidisciplinar, Araraquara, 2021.

Ensaio De Abrasão: Los Angeles E Slake Durability Test. **MINERA JR.**, 2018. Disponível em: <https://minerajr.ufop.br/blog.ensaiosdeabrasao.html>. Acessado em: 06 de março de 2023.

Fabricação: Matérias-primas. **SINPEC**, 2023. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/sinpec/sobre-o-sinpec/historia-do-pneu/fabricacao/>. Acessado em: 11 de janeiro de 2023.

Fernandez, Jaqueline Aparecida Bória. **DIAGNÓSTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, 2012.

Geração de resíduos no mundo deve chegar a 3,4 bilhões de toneladas por ano até 2050. **CNN BRASIL**, 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/geracao-de-residuos-no-mundo-deve-chegar-a-34-bilhoes-de-toneladas-por-ano-ate-2050/>. Acessado em: 24 de janeiro de 2023.

Marinho, Marília Neves. **ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETOS BETUMINOSOS USINADOS A QUENTE COM O USO DE AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO**. Trabalho de Conclusão De Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

Martins, Israel Rodrigo de Freitas. **CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU**. Trabalho de Conclusão De Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

Naya, Bráulio Alvarenga. **A UTILIZAÇÃO DO AGREGADO DA BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO NO CONCRETO DE USO NÃO ESTRUTURAL**. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2014.

O que significa o símbolo da reciclagem?. **LAR PLÁSTICOS**, 2020. Disponível em: <https://blog.larplasticos.com.br/o-que-significa-o-simbolo-da-reciclagem/>. Acessado em: 21 de janeiro de 2023.

Paiva, Paulo Antônio de; Ribeiro, Maisa de Souza. **A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL: COMO ECONOMIA DE CUSTOS**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

Pesquisa Inédita E Exclusiva Revela Cenário Do Mercado Brasileiro De Concreto. **ABCP**, 2013. Disponível em: <https://abcp.org.br/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto/>. Acessado em: 10 de março de 2023.

Quais os processos e vantagens da britagem de entulho?. **CGEA**, 2023. Disponível em: <http://campograndeambiental.com.br/noticias/quais-os-processos-e-vantagens-da-britagem-de-entulho-28>. Acessado em: 06 de março de 2023.

Qual país produz mais lixo?. **IHU**, 2016. Disponível em: <https://www.ihu.unisinos.br/categorias/185-noticias-2016/561243-qual-pais-produz-mais-lixo>. Acessado em: 05 de março de 2023.

Quantos carros tem no Brasil?. **AUTO ESPORTE**, 2022. Disponível em: <https://autoesporte.globo.com/curiosidades/noticia/2022/05/quantos-carros-tem-no-brasil.ghtml>. Acessado em: 11 de janeiro de 2023.

Queiroz, Denise Coelho; Varela, Kamila Moreira; Pereira, Rondinelly Geraldo. **REAPROVEITAMENTO DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO: ESTUDO DE CASO**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - Sul de Minas Gerais: Campus Muzambinho, Muzambinho, 2018.

Ramos, Vitor Emmanoel Tavares Tenório. **ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE CONCRETO PRODUZIDO COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO PROVENIENTE DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO**. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2021.

Reciclagem de Pneus. **AMBIENTE BRASIL**, 2023. Disponível em: https://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/reciclagem/reciclagem_de_pneus.html#:~:text=S%C3%B3%20no%20Brasil%20s%C3%A3o%20produzidos,produ%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A9%20descartada%20nesse%20per%C3%ADodo.&text=Uma%20forma%20encontrada%20para%20amenizar,metodologias%20de%20reciclagem%20e%20reaproveitamento. Acessado em: 11 de janeiro de 2023.

Reciclagem: O Guia Absolutamente Completo. **RECICLASAMPA**, 2020. Disponível em: <https://www.reciclasampa.com.br/artigo/reciclagem:-o-guia-absolutamente-completo#:~:text=A%20reciclagem%20%C3%A9%20o%20processo,qualidade%20de%20vida%20das%20pessoas..> Acessado em: 22 de janeiro de 2023.

Reciclagem: O Que É E Como Você Pode Contribuir. **NEOENERGIA**, 2020. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pt-br/sala-de-imprensa/noticias/Paginas/guia-pratico-reciclagem.aspx>. Acessado em: 20 de janeiro de 2023.

Reciclagem: o que é e qual a importância?. **ECLYCLE**, 2023. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/reciclagem/>. Acessado em: 21 de janeiro de 2023.

Resolução CONAMA nº 307 de 05/07/2002. **LEGISWEB**, 2023. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=98303#:~:text=Estabelece%20diretrizes%20C%20crit%C3%A9rios%20e%20procedimentos,dos%20res%C3%ADduos%20da%20constru%C3%A7%C3%A3o%20civil.&text=Considerando%20que%20a%20gest%C3%A3o%20integrada,Art>. Acessado em: 10 de janeiro de 2023.

Santos, Antônio Carlos dos. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE BORRACHA OBTIDA A PARTIR DA RECICLAGEM DE PNEUS COM APLICAÇÃO EM PLACAS PRÉ-MOLDADAS**. Trabalho de Conclusão De Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2005.

Silva, Luzilene Souza; Mouta, José de Ribamar. **CONCRETO COM BORRACHA DE RECAUCHUTAGEM DE PNEU PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO DE BAIXO TRAFEGO**. Revista Matéria, Belém, 2019.

Silva, Osvaldo Ferreira da. **ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE AGREGADO GRAUDO RECICLADO TRATADO PARA APLICAÇÃO EM CONCRETO**. Trabalho de Conclusão De Doutorado em Materiais. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

Sustentabilidade: O concreto pode ser reciclado. **IBR ENGENHARIA**, 2023. Disponível em: <https://ibr.eng.br/sustentabilidade-o-concreto-pode-ser-reciclado/>. Acessado em: 11 de janeiro de 2023.

Você conhece as partes do pneu do seu carro? Aprenda agora mesmo. **ACHEI PNEUS**, 2021. Disponível em: <https://www.blog.acheipneus.com.br/post/partes-do-pneu-e-funcoes>. Acessado em: 15 de janeiro de 2023.