

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DO SERTÃO – EIXO DAS TECNOLOGIAS
ENGENHARIA CIVIL

BELÃNE GABRIELI GUIMARÃES DOS SANTOS

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO**

DELMIRO GOUVEIA – AL

2020

BELÃNE GABRIELI GUIMARÃES DOS SANTOS

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão, como requisito para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. MSc. Rogério de Jesus Santos.

DELMIRO GOUVEIA - AL

2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza CRB-4
2209

S237a Santos, Belãne Gabrieli Guimarães dos

Análise da influência do resíduo de borracha de pneu nas propriedades do concreto / Belãne Gabrieli Guimarães dos Santos. – 2020.
62 f. : il.

Orientação: Rogério de Jesus Santos.
Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas.
Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2020.

1. Engenharia civil. 2. Concreto. 3. Borracha de pneu. 4. Resíduo.
5. Análise de propriedades. I. Título.

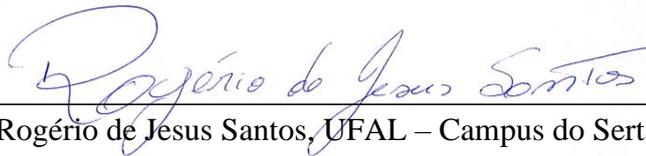
CDU: 691.32

Folha de Aprovação

BELÃNE GABRIELI GUIMARÃES DOS SANTOS

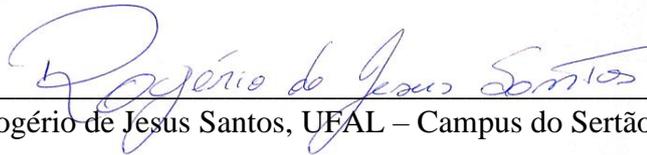
Análise da influência do resíduo de borracha de pneu nas propriedades do concreto

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao corpo docente do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão e aprovado em 21 de outubro de 2020.



Prof. MSc Rogério de Jesus Santos, UFAL – Campus do Sertão (Orientador)

Banca Examinadora:



Prof. MSc Rogério de Jesus Santos, UFAL – Campus do Sertão (Orientador)



Prof.^a MSc. Jéssica Beatriz da Silva, UFAL – Campus do Sertão (Avaliador)



Engenheiro James Monteiro Dias (Avaliador)

AGRADECIMENTOS

Gratidão à Deus pelo dom da vida, e por me mostrar que sou capaz de ir além do que eu achava que seria. Gratidão ao meu pai Manoel Belarmino, e aos meus irmãos Lucas Emanuel e Tereza Raquel, por todo apoio nessa caminhada, nunca foi fácil e sem eles eu não teria conseguido.

Agradeço a minha mãe Jeane Guimarães (em memória) por sempre ter me incentivado a querer ser o melhor que eu poderia, ela me mostrou em vida o verdadeiro propósito de tudo, eu devo tudo o que sou a ela.

Agradeço também ao apoio da minha família: minhas avós Nazaré e Terezinha (em memória); meu avô Fernando; meus primos, em especial ao Pe. Aparecido que me acolheu em sua casa e me deu apoio quando mais precisei; as minhas tias, em especial a minha tia Quitéria (em memória); a minha madrinha Neli, meu padrinho José Bezerra e minha tia do coração Juliana Gomes.

Gratidão aos amigos que fiz na graduação: Amanda, Anne Karoline, Luana, Joyce, Ieda, Ulisses, Júlia, João, Iago e Ricardo, por todo o incentivo durante a caminhada. A minha amiga Altina, por ter me acolhido como se fosse família quando fui morar em Delmiro Gouveia.

Agradeço ao meu namorado Rafael Neto, por todo o apoio durante esses anos, por se fazer presente nos momentos que preciso e por me incentivar a ser sempre melhor. As minhas amigas de infância Bruna, Allayse e Laura Karolinne, obrigada por sempre estarem presentes mesmo com a distância.

Agradeço também ao meu orientador Rogério de Jesus por todo o apoio para a realização desse trabalho, por sua orientação durante a graduação e também na reta final para a realização do TCC. A minha coorientadora Jéssica Beatriz pela disponibilidade em me auxiliar com a elaboração desse trabalho e pelos ensinamentos transmitidos.

Agradeço também ao técnico do laboratório de materiais Arnon pela ajuda na realização dos ensaios, e a Universidade Federal de Alagoas (UFAL) por me proporcionar a realização desse sonho.

A gravidade explica os movimentos dos planetas,
mas não pode explicar quem colocou os planetas em movimento.
Deus governa todas as coisas e sabe tudo que é ou que pode ser feito.

ISAAC NEWTON

RESUMO

O presente trabalho se trata da análise das propriedades do concreto com a influência do acréscimo de resíduo de borracha de pneu. Foram acrescentadas nas massas de concretos as proporções de 5 e 10% em função da quantidade de cimento utilizada para o traço. Como também foi realizado o mesmo traço do concreto sem a adição de resíduos, para assim verificar as possíveis variações nas propriedades do concreto no estado endurecido. Foram realizados em laboratório ensaios para comparação entre os concretos com a adição de proporção de resíduos e o concreto de referência. Sendo assim, foram realizados ensaios de resistência à compressão, ensaios para determinação da absorção por imersão e fervura, para a determinação do índice de vazios e da massa específica. Verificou-se a redução da resistência à compressão nos concretos com a adição de resíduos, sendo de 26,90% para o concreto com 5% de resíduo e 56,64% para o concreto com 10% de resíduo essa redução, Verificou-se também um aumento nos Índices de Absorção e de Vazios, o que também contribuiu para a diminuição da resistência a compressão.

Palavras-chave: Concreto; Resíduo; Ensaio; Laboratório. Borracha.

ABSTRACT

This present undergraduate thesis is about the analysis of the properties of concrete with the influence of tire rubber residue addition. There were added into the concrete masses the proportion of 5 and 10% in function of the cement amount used for the trace. It has also done the same concrete trace without addition of residues, so it could be verified the possible variations in the properties of the concrete in the hard-bitten state. There has been performed in laboratory tests to make a comparison between the concrete with addition of waste proportion and the reference concrete. Therefore, there has been performed compression strength tests, tests for determination of absorption by immersion and boiling, for the determination of void index and specific mass. In this way, it has turned out the reduction of compressive strength in concretes with the addition of residues, being 26.90%, for concrete with 5% residue and 56.64% for concrete with 10% residue. It has also performed an increase absorption and void indices, which also contributed to decreased compressive strength.

Key-words: Concrete; Residue; Trials; Lab. Rubber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Detalhamento da estrutura de um pneu.....	19
Figura 2: Seção transversal de um pneu automotivo.....	19
Figura 3: Composição de pneus radiais para automóveis.....	21
Figura 4: Esquemática da fabricação de um pneu.....	22
Figura 5: Zona de transição entre a pasta cimento-borracha e a pasta cimento-areia. ..	24
Figura 6: Curvas tensão deformação controladas.....	26
Figura 7: Incêndio em pneus em Stanislaus Co.California (setembro de 1999).....	26
Figura 8: Resíduo de borracha de pneu.	31
Figura 9: Pesagem dos materiais para concreto modelo.....	32
Figura 10: Pesagem de 5% de resíduo para o concreto.	33
Figura 11: Pesagem de 10% de resíduo para o concreto	33
Figura 12: Óleo utilizado nos moldes.....	34
Figura 13: Molde dos CP's.....	35
Figura 14: CP's na mesa vibratória.	35
Figura 15: CP's submersos na água para cura.....	36
Figura 16: CP's submersos na água para cura.....	36
Figura 17: Máquina retificadora de corpos de prova.....	37
Figura 18: Capeamento de corpos de prova.	37
Figura 19: Rompimento de CP.	38
Figura 20: Rompimento de corpo de prova através de prensa hidráulica com uso de Neoprene.....	39
Figura 21: Corpos de prova imersos em água para fervura.....	39
Figura 22: CP's em estufa.	40
Figura 23: CP em Balança Hidrostática.	40
Figura 24: Balança Hidrostática utilizada no ensaio.	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Comparação das resistências médias de compressão.....	44
Gráfico 2: Comparação dos resultados da massa específica seca.	51
Gráfico 3: Comparação dos resultados da massa específica saturada.	51
Gráfico 4: Comparação dos resultados da massa específica real.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quantidade de Materiais	31
Tabela 2: Dados do ensaio de resistência a compressão.	42
Tabela 3: Avaliação dos resultados obtidos no ensaio de compressão.....	43
Tabela 4: Avaliação do ensaio do coeficiente de variação dentro do ensaio.	43
Tabela 5: Massas de amostras com adição de 5% de resíduos.....	46
Tabela 6: Massas de amostras com 5% de adição de resíduos.....	46
Tabela 7: Resultados da absorção e índice de vazios para o concreto com 5% de resíduo.	46
Tabela 8: Massas de amostras com adição de 10% de resíduos.....	47
Tabela 9: Massas de amostras com 10% de adição de resíduos.....	47
Tabela 10: Resultados da absorção e índice de vazios para o concreto com 10% de resíduo.	47
Tabela 11: Massas de amostras sem adição de resíduos.	48
Tabela 12: Massas de amostras sem resíduos.....	48
Tabela 13: Resultados da absorção e índice de vazios para o concreto de referência....	48
Tabela 14: Resumo dos Índices de Absorção.....	49
Tabela 15: Resumo dos Índices de Vazios.	49
Tabela 16: Massas específicas dos tipos de concretos ensaiados.....	50

LISTA DE ABREVIACOES

ABCP	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND
ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
CASAL	COMPANHIA DE SANEAMENTO DE ALAGOAS
CONAMA	CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE
CP	CORPO DE PROVA
DOTs	DEPARTAMENTOS DE TRANSPORTES ESTADUAIS
EPA	AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL
EUA	ESTADOS UNIDOS
FNMA	FUNDO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE
IBAMA	INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
ISTEA	INTERMODAL SURFACE TRANSPORTATION EFFICIENCY ACT
UFAL	UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.2 Objetivos da pesquisa	16
1.2.1 Objetivos gerais.....	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 Breve histórico do desenvolvimento da borracha usada em pneus.....	17
2.2 Componentes e materiais usados na fabricação de pneus.....	17
2.3 Aplicações na Engenharia Civil	23
2.4 Problemática ambiental gerada por pneus inservíveis.....	26
2.4.1 Legislação ambiental referente a problemática dos pneus inservíveis.	28
3. METODOLOGIA	30
3.1 Caracterização dos materiais	30
3.1.1 Água.....	30
3.1.2 Agregado miúdo (areia).....	30
3.1.3 Agregado graúdo (brita)	30
3.1.4 Cimento	30
3.1.5 Resíduo de borracha de pneu	30
3.2 Traço do concreto	31
3.3 Dosagens para o traço de concreto	32
3.3.1 Pesagem para concreto modelo (sem adição de resíduo).....	32
3.3.2 Pesagem para concreto com 5% de adição de resíduo.....	33
3.3.3 Pesagem para concreto com 10% de adição de resíduo.....	33
3.4 Moldagem e desmoldagem dos corpos de prova	34
3.5 Capeamento dos corpos de prova	36
3.6 Resistência a compressão	37
3.6.1 Ensaio de resistência a compressão.....	37
3.7 Absorção, índice de vazios e massa específica.....	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 Ensaio de resistência a compressão.....	42
4.2 Ensaio de determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica.	45
4.2.1 Absorção de água por imersão (A).....	45
4.2.2 Índice de vazios (<i>I_v</i>)	45
4.2 Resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios do concreto com 5% de resíduo.....	45

4.3	Resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios do concreto com 10% de resíduo.....	46
4.4	Resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios do concreto de referência	48
4.5	Massa específica da amostra seca (ρ_s).....	50
4.6	Massa específica da amostra saturada (ρ_{sat})	50
4.7	Massa específica real (ρ_r).....	50
4.8	Resultados das massas específicas.....	50
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, existe uma grande preocupação acerca dos resíduos dispostos ao meio ambiente. Diante disso, há uma frequente busca por processos que utilizem resíduos que seriam destinados a natureza, gerando assim um reaproveitamento desses materiais.

A reciclagem de resíduos industriais é hoje uma necessidade para a preservação do meio ambiente, redução do custo e consumo de energia na produção de materiais e componentes de construção. No Brasil, são descartados mais de 35 milhões de pneus anualmente e existe cerca de 100 milhões de pneus abandonados no meio ambiente. (KAMIMURA, 2002).

Uma das problemáticas enfrentadas pela humanidade no início do século XXI é relacionada a destinação final dos resíduos gerados pela população. Tendo em vista que grandes quantidades de borracha usada na confecção de pneus para aviões, caminhões, carros, etc., são descartados quando se tornam inservíveis, isto é, quando eles não têm mais condições de serem reparados (ADHIKARI et al., 2000).

A falta de recursos financeiros para o reaproveitamento dos mesmos contribui para que haja um acúmulo de pneus inservíveis a margem de rodovias, lixões a céu aberto, lagos, rios, terrenos, etc. De acordo com BLUMENTHAL (1997) e SZPILMAN (1999), os principais comércios para utilização de um número expressivo de pneus são: combustível alternativo, produtos de borracha e aplicações na engenharia civil.

Diante disso, o presente trabalho se trata da análise das propriedades do concreto com a influência do acréscimo de resíduo de borracha de pneu. Onde foram acrescentadas nas massas de concretos as proporções de 5 e 10% em função da quantidade de cimento utilizada para o traço, possibilitando assim a verificação das alterações no concreto

Para que fosse possível verificar tais alterações, foram utilizados ensaios em laboratório para analisar quais propriedades do concreto sofreram modificações e quais foram essas alterações que ocorreram sob a influência do resíduo de borracha de pneu.

Dessa forma, esse trabalho irá abordar preocupação tanto ambientais quanto tecnológicas, tendo como intuito discorrer sobre os benefícios do uso do resíduo da borracha de pneu para as propriedades do concreto e apresentar uma proposta para a destinação desse resíduo na área da construção civil.

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 Objetivos gerais

Averiguar as propriedades do concreto sobre a influência dos percentuais de resíduo de borracha de pneu de 5 e 10% nos estados fresco e endurecido.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar a absorção de água, o índice de vazios por imersão e fervura, e as massas específicas dos concretos endurecidos
- Determinar a resistência a compressão do concreto de referência e dos concretos com adição de 5 e 10% de resíduo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Os subtópicos seguintes apresentarão informações sobre a história, a origem e a composição da borracha utilizada na fabricação de pneu.

2.1 Breve histórico do desenvolvimento da borracha usada em pneus

De acordo com Martins (2005, p.26) o uso da borracha antecede o ano de 1500, onde os índios Latino-Americanos, entre outras utilizações, já fabricavam de forma grosseira seringas para armazenar líquidos e bolas utilizadas para brincadeiras. Posteriormente, as árvores da espécie *Hevea Brasilienses*, receberam o nome popular de seringueiras devido as seringas que eram usadas.

Os pneus de borracha foram inventados em 1845, por R. W. Thomson, entretanto o processo de vulcanização da borracha usada nos pneus de veículos rodoviários foi descoberto casualmente por Charles Goodyear em 1939, quando deixou cair enxofre em uma amostra de borracha que estava sendo aquecida, tornando-a assim mais resistente e elástica. Logo, foi descoberto um material mais elástico e resistente que passou a ser utilizado no mundo todo (Goodyear, 1999).

Na Alemanha, a partir da Primeira Guerra Mundial, surgiu a nova tecnologia da fabricação de borracha sintética derivada do petróleo. Entretanto, apesar da borracha sintética ser semelhante a borracha natural, a mesma não resiste tanto ao calor e racha com a mudança repentina de temperatura. Logo, os elementos sempre possuem também uma quantidade de borracha natural (PETROFLEX, 2001).

Em seguida as borrachas substituíram as rodas de madeira e ferro que até então eram utilizadas em carruagens e carroças. Como a borracha é um material com resistência e durabilidade elevada, absorve bem o impacto das rodas com o solo, acarretando assim que os transportes ficassem bem mais confortáveis e com uma melhor funcionalidade. No século XX, com o desenvolvimento da indústria automobilística, o consumo de pneus atingiu números grandiosos, tornando-se assim necessário para o cotidiano da população para o transporte de cargas e passageiros (PETROFLEX, 2001).

2.2 Componentes e materiais usados na fabricação de pneus

Atualmente, os pneus são produzidos para durarem sobre condições extremas, tanto físicas, quanto químicas ou térmicas. Isso porque a maioria das estradas brasileiras

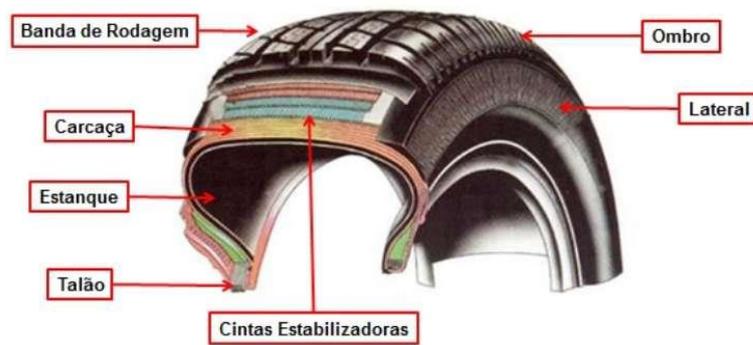
possuem más condições exige que os pneus possuam cada vez mais resistência, como também o constante aumento no transporte de cargas pelas rodovias brasileiras, acarretando assim cada vez mais pneus resistentes e duráveis.

Os pneus apresentam uma estrutura bastante complexa, com o intuito de conceder-lhes as características cruciais para sua segurança e desempenho. Os mesmos são projetados para serem indestrutíveis, sendo confeccionados com bastante precisão. Entretanto, um pneu se torna inservível quando a lona se rompe, está fisicamente danificado ou não pode ser recauchutado. (NOVICK e MARTIGNONI, 2000).

Os pneus são constituídos por diversos materiais como: náilon, fibra de aramida, estrutura em aço, fibra de vidro e/ou poliéster; borracha natural e sintética, agregando assim centenas de polímeros diferentes; reforçadores químicos, como carbono preto, resinas e sílica; anti-degradantes (ceras de parafina antioxidantes e inibidoras da ação do gás ozônio); promotores de adesão (sais de cobalto, banhos metálicos nos arames e resinas); produtos auxiliares, no processamento dos pneus, como óleos e agentes de cura (aceleradores de cura, ativadores, enxofre) (PIRELLI BRAZIL, 2000).

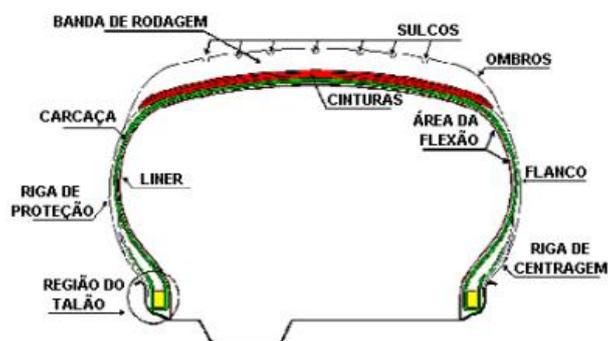
Os pneus automotivos, radiais ou convencionais, possuem diversos componentes fabricados com diferentes tipos de materiais. Esses diferentes componentes possuem funções específicas para o uso e desempenho do pneu. Cada componente possui materiais que refletem características distintas. Essencialmente o pneu automotivo é composto por uma banda de rodagem, talões, carcaça e paredes laterais (BNDES, 1998). Sendo ilustrado nas Figura 1 e Figura 2.

Figura 1: Detalhamento da estrutura de um pneu.



Fonte: Bridgestone, 2013.

Figura 2: Seção transversal de um pneu automotivo.



Fonte: Pirelli, 2000.

Através do detalhamento da estrutura do pneu automotivo são ilustradas suas partes constituintes, sendo as mesmas: (BNDES, 1998).

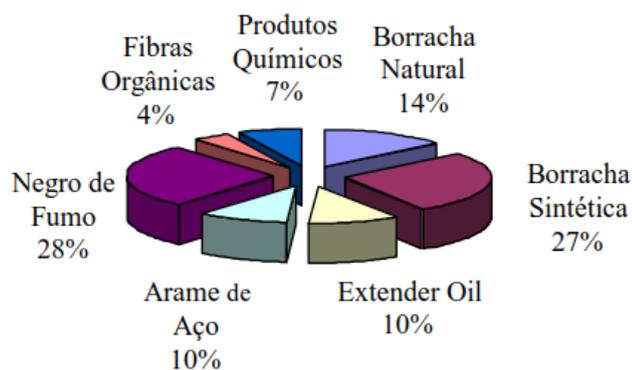
- **Banda de Rodagem:** parte do pneu que entra diretamente em contato com o solo. Produzida por um composto especial de borracha que concede uma resistência elevada ao desgaste. Seus desenhos constituídos por partes vazias (sulcos) e cheias (biscoitos), concedendo assim aderência, tração, estabilidade e segurança do produto.
- **Talão:** tem a forma de um anel e possui a função de manter o pneu acoplado ao

aro sem permitir vazamentos de ar. Também é constituído por diversos arames de aço de alta resistência, unidos e recobertos por borracha.

- **Carcaça:** estrutura interna do pneu, com a função de reter o ar sob pressão e aguentar o peso do veículo. É composto por lonas de poliéster, náilon ou aço, dispostas no sentido diagonal, uma das outras, nos pneus ditos convencionais e no sentido radial, nos pneus ditos radiais. As lonas para pneus de carga (caminhões e ônibus) são sempre de aço.
- **Flancos:** parte lateral do pneu que possui a função de proteger a carcaça. São constituídos por borrachas com alto grau de flexibilidade. De acordo com a carcaça, os pneus estão classificados em dois grupos, radiais e convencionais (ou diagonais). Os radiais possuem maior teor de borracha natural, que lhes proporciona, aliado aos reforços estruturais e novos desenhos da banda de rodagem, maior resistência, durabilidade, aderência e estabilidade que os convencionais.

Mesmo tendo um custo superior os pneus radiais possuem a tendência de serem os únicos usados mundialmente, pois os mesmos dominam o mercado de automóveis utilizados para passeio, com 97% da produção mundial. Também possuem uma participação de 45% da produção total no mercado de caminhões e ônibus. No entanto, os pneus radiais para caminhões e ônibus utilizam um teor bem maior de borracha natural que para carros de passeio. Para caminhões e ônibus cerca de 40% em peso são de borracha natural, enquanto que em carros de passeio apenas cerca de 15% em peso. (BNDES, 1998). Sendo mostrada na Figura 3 a composição típica de pneus radiais para automóveis.

Figura 3: Composição de pneus radiais para automóveis.

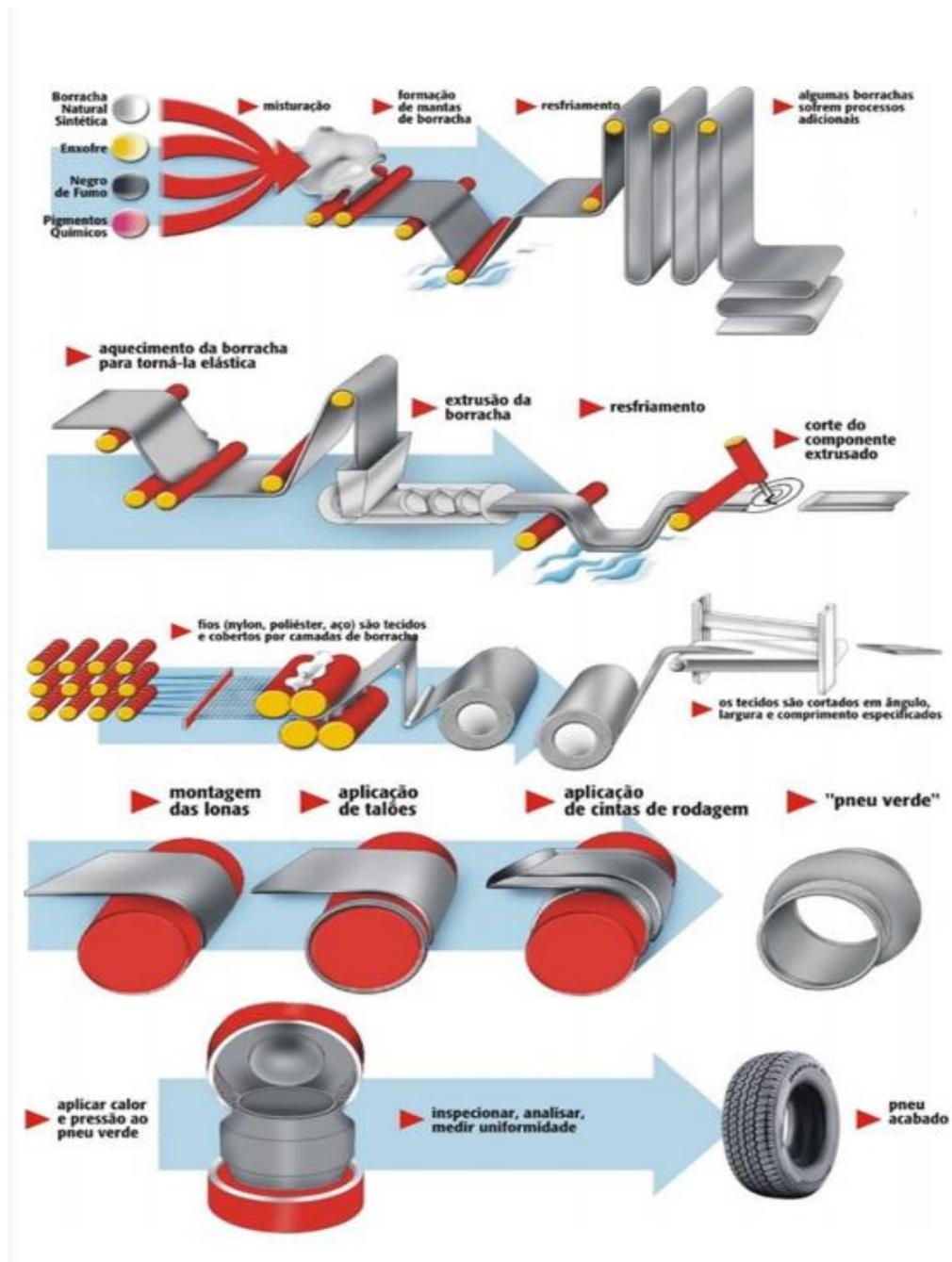


Fonte: BNDES, 1998.

Os pneus também podem ou não possuir câmara, os pneus que não possuem câmara têm a montagem e desmontagem em um tempo inferior aos que possuem. Também ao serem perfurados perdem o ar pausadamente o que proporciona uma maior segurança ao usuário. (BNDES, 1998).

A Figura 4 ilustra o esquema de fabricação dos pneus, iniciando na mistura, passando pelos processos de extrusão, lonas, talões, construção e vulcanização.

Figura 4: Esquemática da fabricação de um pneu.



Fonte: SILVA, A. CASTRO, V. 2017.

Durante a processo de fabricação da borracha são adicionados diversos aditivos. O negro de fumo por exemplo é adicionado com o intuito de aumentar a resistência mecânica dos pneus. Segundo FIRESTONE cerca de $\frac{1}{4}$ do peso de um pneu corresponde ao aditivo negro de fumo, responsável pelos maiores problemas ambientais da indústria de pneumáticos, pois dificulta a reciclagem. (BNDES, 1998).

Na etapa de vulcanização dos pneus é adicionado uma quantidade de enxofre, podendo também ser adicionada sílica amorfa com o intuito de substituir parcialmente ou totalmente o negro de fumo. Essa adição de sílica amorfa no processo de fabricação melhora as propriedades dinâmico-mecânicas e de processabilidade da borracha, o que reduz o atrito entre o pavimento e o pneu. Essa substituição acarreta em um menor consumo de combustíveis, o que possibilita uma menor emissão de gases, sendo assim os pneus que utilizam essa tecnologia são conhecidos como pneus verdes (RHODIA, 1998).

Os pneus de caminhões possuem uma quantidade maior de borracha natural em sua composição, enquanto os pneus de automóveis possuem mais borracha sintética. A borracha natural possui propriedades elásticas, já a borracha sintética possui propriedades térmicas (RUTH et al.,1997).

2.3 Aplicações na Engenharia Civil

Visando amenizar os impactos ambientais causados pela disposição final dos resíduos de pneus, diversas medidas podem ser tomadas com o intuito de mitigar os danos causados pela disposição final inadequada de pneus. Essas diversas medidas podem partir de um nível tecnológico, operacional ou gerencial.

Serão abordadas a seguir medidas para o reaproveitamento em aplicações no âmbito tecnológico, visto que serão mostradas diversas formas de fazer o reaproveitamento em aplicações na Engenharia Civil.

De acordo com Adhikari, De e Maiti (2000, p.939), na área da pavimentação o uso de borracha de pneu em misturas asfálticas proporciona como vantagem o aumento de resistência a variação de temperatura e capacidade de drenagem. Para Pierce e Blackwell (2003, p.197) os resíduos de borracha de pneu podem ser utilizados em misturas de solo-cimento destinadas a estabilização de aterros, preenchimentos de valas, cabeceiras de pontes, entre outras diversas aplicações.

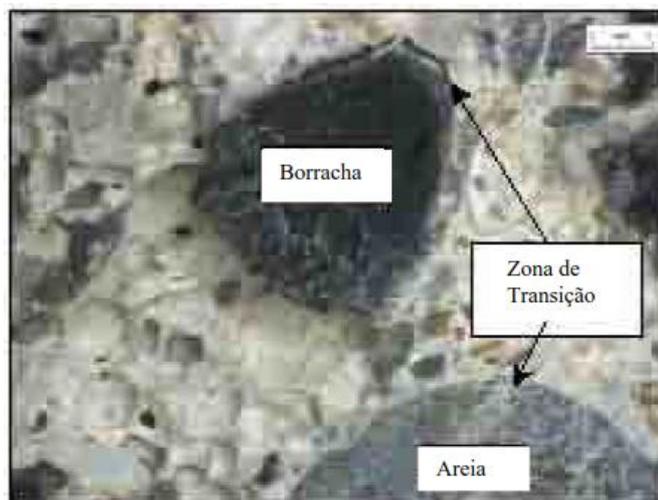
Bignozzi, Saccani e Sandrolini (2000, p.97) pesquisaram sobre a produção de argamassas poliméricas com a adição de borracha reciclada. Turatsinze, Bonnet e Granju (2004, p.26) definiram o uso de resíduos de borracha de pneu na produção de materiais a base de cimento como uma excelente oportunidade para auxiliar na preservação do meio ambiente, à medida que aumente o reuso e a reciclagem dos pneus inservíveis que são descartados incorretamente em todo o mundo.

A substituição parcial de agregados naturais por resíduos de borracha de pneus inservíveis colabora com a preservação do meio ambiente, como também reduz o uso de agregados naturais colaborado com a qualidade ambiental.

Também existem diversos estudos sobre a influência do incremento de resíduo de borracha de pneu na resistência e na microestrutura do concreto. A adição desse resíduo nos materiais à base de cimento resulta na diminuição da resistência a compressão e na acelerada redução na resistência a flexão, no entanto, ocorrem progressos em outras propriedades. (MARTINS, 2005).

Ao analisarem a microestrutura de concretos com resíduos de borracha de pneu, Turatsinze, Bonnet e Granju (2004, p.6), observaram a existência de uma zona de transição¹ pasta de cimento-borracha fraca em relação a pasta de cimento areia. Esses autores asseguraram que essa microestrutura em particular constituiria um fator adicional para o acontecimento da redução da resistência à compressão dos concretos com adição de borracha. A Figura 5 caracteriza essa zona de transição.

Figura 5: Zona de transição entre a pasta cimento-borracha e a pasta cimento-areia.



Fonte: Turatsinze, Bonnet e Granju (2004, p.6).

Em diversos estudos sobre a adição de borracha de pneu em pastas de cimento, argamassas ou em concretos é feito um tratamento superficial da borracha, onde é

¹ Região com maior porosidade e heterogeneidade do que o restante da pasta. Essa porosidade é decorrente da relação água/cimento na mistura como resultado do filme de água que se forma em torno no agregado. É a interface entre o agregado e a pasta.

adicionada uma solução de Hidróxido de Sódio (NaOH) com o objetivo de melhorar a adesão entre a matriz da borracha e do cimento. De acordo com Segre, Monteiro e Sposito (2002, p.521-522) após o tratamento superficial da borracha com a solução de NaOH ocorreu um aumento em diversas propriedades mecânicas nas pastas de cimento.

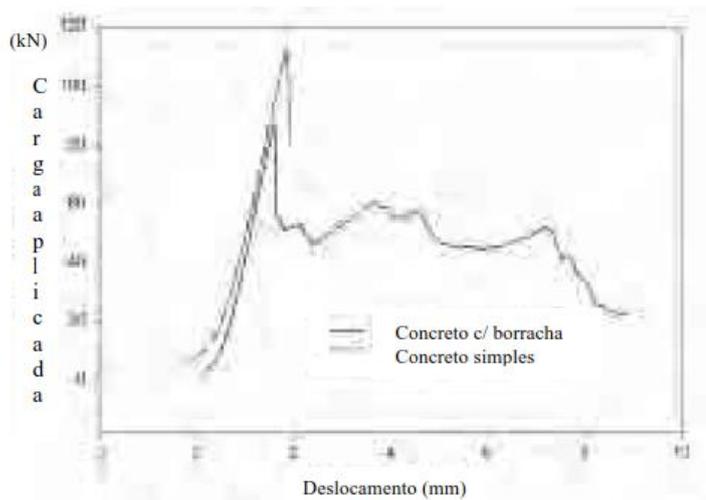
Em relação a trabalhabilidade, Albuquerque et al. (2002, p.14) diz que quando analisada no teste de abatimento de tronco de cone essa propriedade diminui ao ser adicionado um percentual de resíduo de borracha de pneu. No entanto, quando medida com o teste VeBe, essa propriedade aumenta em concretos com certos teores de resíduo quando comparada ao concreto controle ou modelo.

Entretanto, Li et al, (2004, p.4) ao analisarem a consequência de incremento de resíduo de borracha de pneu na trabalhabilidade de concretos convencionais observaram que ocorreram apenas alterações mínimas nos resultados dos abatimentos. Enquanto, Güneyise, Gesoglu e Özturan (2004, p. 2311) afirmaram uma grande redução do abatimento com o aumento da quantidade de resíduo implementada em concretos com baixa relação água/aglomerante, quando adicionados ou não de sílica ativa. Concluindo-se que a influência dos resíduos de borracha de pneu na trabalhabilidade do concreto está relacionada a condição água/aglomerante utilizada.

De acordo com Khatib e Bayomi apud Meneghini (2003, p.15), ao examinarem a trabalhabilidade de concretos com o incremento de resíduos de borracha de pneus com diferentes granulometrias, concluíram que os resíduos de menor granulometria davam origem a argamassas com uma menor trabalhabilidade.

Segundo Li et al. (2004, p.4) os concretos que tiveram adição do resíduo de borracha de pneu quando comparados aos sem resíduos, tiveram um aumento considerável na sua tenacidade (área sob a curva), o que proporcionou uma melhora na capacidade de absorver cargas dinâmicas e na resistência à propagação de fissuras. A Figura 6 mostra as curvas de tensão-deformação.

Figura 6: Curvas tensão deformação controladas



Fonte: Li et al (2004, p.4).

Akasaki et al. (2003,p.15) afirma que os corpos de prova com ou sem adição de resíduos de borracha de pneu ao serem submetidos à flexão tem uma diminuição da capacidade de flexão nos que possuem um percentual de borracha, entretanto apresentaram capacidade de resistência residual depois da ruptura.

2.4 Problemática ambiental gerada por pneus inservíveis

Após tragédias ambientais ocorridas em estoques de pneus inservíveis, acarretando a contaminação do ar, da água e do solo como ocorreu nos Estados Unidos, na década de 80, como mostra a Figura 7, surgiu o interesse em pesquisas sobre reaproveitamento e a reutilização dos pneus em obras de engenharia. (KAMIMURA, 2002).

Figura 7: Incêndio em pneus em Stanislaus Co.California (setembro de 1999)



Fonte: Reschner,2002.

Quando ocorrem incêndios como este o tempo que leva para apagá-los pode prolongar-se por semanas ou até meses, como ocorreu em Virginia nos Estados Unidos, onde o incêndio de Rhinehart em Winchester durou aproximadamente nove meses., liberando assim grande quantidade de compostos perigosos (LIU, et al., 1998).

Os riscos ambientais ligados à presença de pneus inservíveis impulsionaram a criação de legislações a nível estadual, municipal e federal em diversos países. Atualmente, 48 estados americanos possuem legislações/regulamentações específicas de pneus. As leis estaduais regulamentam a compra, armazenagem e processamento dos pneus, confere advertências para armazenagem em aterros sanitários e ofertam incentivos para o desenvolvimento de novas alternativas de uso, ajudando a fortalecer os mercados para pneus descartados (RESCHNER, 2002; RMA, 2001).

Em 1991, em grande parte dos Estados proibiu-se a disposição final de pneus inteiros nos aterros sanitários, tolerando o descarte desses inservíveis triturados, porém com taxas bem elevadas, o que acarretou uma alternativa economicamente inviável. (HEITZMAN, 1992).

Nos Estados Unidos a seção 1038 da Lei 102-240, que trata a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície de 1991 (*Intermodal Surface Transportation Efficiency Act* – ISTEA, 1991), sobre o “uso do material reciclado em pavimentação visando a proteção ambiental”, obrigou os Departamentos de Transportes Estaduais (DOTs) e a Agência de Proteção Ambiental (EPA), em cooperação, a desenvolver estudos para utilizar pneus na construção de pavimentos asfálticos. Esta lei estabelece o uso de um percentual mínimo de borracha reciclada nas misturas asfálticas, aumentando de 5% em 1994 até 20% em 1997, e de tal modo se mantendo nos anos seguintes. A lei garante incentivos fiscais aos Estados que utilizam borracha de pneus nas misturas asfálticas e prevê punições aos Estados que não a obedecem (EPPS, 1994).

Nos Estados Unidos referindo-se aos pneus, a Gestão de Resíduos Sólidos, possui cinco princípios, sendo eles (LUND, 1993):

- Princípio do “berço ao túmulo”: o setor produtivo é responsável pelo seu produto, até o término do ciclo de vida desse produto;
- Princípio da responsabilidade: o setor produtivo é responsável pelo custo da coleta e disposição final dos resíduos sólidos considerados recicláveis;
- Princípio do direito de saber do cidadão: todo o cidadão tem direito de saber quais são os resíduos gerados no processo produtivo, assim como: onde, quem e como

é realizado o tratamento destes resíduos;

- Princípio da corresponsabilidade: toda a empresa de tratamento e disposição final de resíduos sólidos será corresponsável pelos resíduos ali tratados, ou disposto. Caso receba um determinado resíduo quer seja doméstico, ou industrial, deverá emitir um certificado de aceitação desse resíduo. O intuito dessa certificação é controlar se o setor produtivo industrial está usando alguma matéria-prima em sua linha de produção que seja proibida nos EUA;

No ano de 2003 proibiu-se a deposição de pneus inteiros em aterros sanitários e, a partir de 2006, pneus de qualquer forma foram proibidos nos estados membros da União Europeia (RESCHNER, 2002).

2.4.1 Legislação ambiental referente a problemática dos pneus inservíveis.

No Brasil as legislações a nível Federal, Estadual e Municipal, tratam sobre a geração, manuseio e reaproveitamento dos resíduos gerados. Os órgãos: Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) são responsáveis por tais legislações.

As normas da série ISO 9.000 deram origem a série de normas ISO 14.000, as quais se referem as normas ambientais. No entanto, também deve ser consultada a legislação ambiental vigente em cada estado, visto que geralmente varia um estado para o outro. Devem ser consultadas as legislações federais, municipais e estaduais. Assim como a NBR 10.004 (Resíduos Sólidos – Classificação), estabelece os critérios para classificação dos resíduos sólidos quanto aos riscos possíveis ao meio ambiente e a saúde do ser humano.

De acordo com a Resolução nº 235 do CONAMA, de 7 de janeiro de 1998, os pneus usados são classificados quando a sua origem como resíduos especiais e quanto a sua natureza como de classe III, que não aqueles considerados inertes. Vale ressaltar que a Constituição Federal Brasileira, estabelece os direitos tanto do Estado quanto dos Cidadãos quanto a saúde a ao meio ambiente. No artigo 23, inciso VI, estabelece que é competência comum da União, Estados e Municípios a proteção ao meio ambiente e o combate à poluição.

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos, em sua subseção X (dos pneumáticos), estabelece os encargos dos fabricantes e importadores de pneus, designando-os o gerenciamento dos resíduos sólidos gerados. Esse gerenciamento deve estar de acordo com o Plano de Gerenciamento de Resíduos Especiais, e aprovado pelo Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA).

O Brasil foi um dos pioneiros a criar uma lei que obriga os fabricantes e importadores de pneus a contrabalançar a produção e importação dos mesmos com a destruição de uma grande quantidade de pneus inservíveis ou de carcaças de pneus que antes eram apenas abandonadas no meio ambiente.

3. METODOLOGIA

O capítulo em questão apresentará os ensaios realizados para a obtenção dos dados dessa pesquisa. Também irá abordar os procedimentos realizados para a dosagem do concreto e a moldagem dos corpos de prova. Os ensaios efetuados nessa pesquisa foram o de compressão, de absorção e índice de vazios. Todos os ensaios foram realizados no laboratório de materiais da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) – Campus do Sertão.

3.1 Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados para esta pesquisa foram os seguintes: água, areia, brita 0 e brita 1, cimento e resíduos de borracha de pneu. Portanto, foram usados agregados miúdos e graúdos, água, cimento e resíduo.

3.1.1 Água

A água utilizada foi obtida através da fornecedora local de água encanada, a Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL).

3.1.2 Agregado miúdo (areia)

A areia utilizada para esta pesquisa foi fornecida pelo laboratório de materiais, entretanto não foi possível identificar sua origem. A NBR 7211/2009 trata sobre os agregados utilizados para concreto e suas especificações.

3.1.3 Agregado graúdo (brita)

Para a realização desta pesquisa foram utilizados dois tipos de brita, brita 0 e brita 1. De acordo com a NBR 7211/2009 a brita 0 possui dimensões que variam entre 4,8 mm a 9,5 mm, e a brita 1 entre 9,5 mm e 19 mm.

3.1.4 Cimento

O cimento utilizado foi o CP II F, que possui fabricação conforme a NBR 16.697/2018. O CP II F é do tipo Cimento Portland Composto com adição de filler, com material carbonático, e classe de resistência 25, 32 ou 40 Mpa.

3.1.5 Resíduo de borracha de pneu

O resíduo utilizado nesta pesquisa foi fornecido gratuitamente pela Secretaria do Meio Ambiente do município de Delmiro Gouveia – AL. O resíduo é obtido de pneus inservíveis, os quais a secretaria através de um maquinário realiza a trituração dos mesmos com a finalidade de evitar o abandono desses pneumáticos em terrenos ou lixo

comum. Logo, todo o resíduo de borracha de pneu utilizado para essa pesquisa descende de pneus inservíveis.

A Figura 8 mostra o resíduo de borracha utilizado para esta pesquisa.

Figura 8: Resíduo de borracha de pneu.



Fonte: Autor, 2019.

3.2 Traço do concreto

Para o do traço usado na obtenção do concreto foi escolhido o mesmo traço utilizado por Dias (2019, p.44) que diz, “O traço escolhido foi o de 25 Mpa, e os cálculos foram realizados conforme a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (2002): (Cimento, areia, brita 0, brita 1; a/c) = (1:1,3:0,80:1,86:0,53)”.

A partir das relações acima foram determinadas as quantidades necessárias de cada material: cimento, areia, água e brita. Para os outros traços foram acrescidos um percentual de 5% e 10% do resíduo de borracha de pneu em função da quantidade de cimento utilizada.

Tabela 1: Quantidade de Materiais

Materiais	Quantidade considerando possíveis perdas (Kg)		
	Sem adição de resíduo	Com 5% de adição	Com 10% de adição
Cimento	7,40	7,40	7,40
Areia	9,62	9,62	9,62
Brita 0	5,92	5,92	5,92
Brita 1	13,76	13,76	13,76
Resíduo de borracha de pneu.	0	0,37	0,74

Fonte: Adaptado de Dias, 2019.

Foram produzidos 27 corpos de prova, sendo: 9 corpos de prova sem adição de resíduos, 9 corpos de prova com 5% de adição de resíduo e 9 corpos de prova com 10% de adição de resíduo.

3.3 Dosagens para o traço de concreto

Foram analisados três diferentes traços de concreto, como mostram os tópicos a seguir.

3.3.1 Pesagem para concreto modelo (sem adição de resíduo).

A Figura 9 mostra a pesagem dos materiais para o traço do concreto usado.

Figura 9: Pesagem dos materiais para concreto modelo.



Fonte: Autor, 2019.

3.3.2 Pesagem para concreto com 5% de adição de resíduo

De forma análoga foi realizada a pesagem para o traço do concreto com a adição de 5% de resíduo de borracha de pneu. No entanto, para esse segundo concreto foi adicionada uma proporção de 5% de resíduo em relação a quantidade de cimento como ilustrado na Figura 10 a seguir.

Figura 10: Pesagem de 5% de resíduo para o concreto.



Fonte: Autor, 2019.

3.3.3 Pesagem para concreto com 10% de adição de resíduo

O traço do concreto com a adição de 10% de resíduo de borracha de pneu foi realizado de forma análoga as anteriores. No entanto, foi adicionada uma proporção de 10% de resíduo em relação a quantidade de cimento como ilustrado na Figura 11 a seguir.

Figura 11: Pesagem de 10% de resíduo para o concreto



Fonte: Autor, 2019.

3.4 Moldagem e desmoldagem dos corpos de prova

A mistura dos materiais na betoneira ocorreu da seguinte forma:

1. Foram adicionadas as britas 0 e 1 e uma parcela da água, ligando a betoneira em seguida e misturando assim os dois materiais;
2. Foram adicionados o cimento e a areia, e novamente ligou-se a betoneira misturando-os assim ao restante dos materiais
3. Para os concretos com adição de resíduo foram adicionados primeiro suas respectivas quantidades de borracha de pneu, misturando o resíduo aos demais materiais;
4. No final foi adicionado o restante da água e misturou-se aos demais materiais.

Para facilitar o desmolde dos corpos de prova, antes da moldagem foi passado óleo nos moldes. A Figura 12 mostra o óleo utilizado em todos os moldes.

Figura 12: Óleo utilizado nos moldes



Fonte: Autor, 2019.

Os corpos de prova foram moldados e desmoldados conforme a NBR 5738/2018, com moldes de 100mm de diâmetro e 200 mm de altura. As figuras 13 e 14 mostram a moldagem dos CP's:

Figura 13: Molde dos CP's.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 14: CP's na mesa vibratória.



Fonte: Autor, 2019.

Após 24 horas foram realizados os desmoldes dos CP's. Os procedimentos necessários para a cura do concreto nos CP's também são fornecidos pela NBR 5738/2018. Na pesquisa foi obedecido o tempo de cura de 28 dias conforme recomendado por norma. As figuras 15 e 16 mostram os CP's submersos em água durando o tempo de cura dos mesmos.

Figura 15: CP's submersos na água para cura.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 16: CP's submersos na água para cura.



Fonte: Autor, 2019.

3.5 Capeamento dos corpos de prova

Foi realizado o capeamento dos corpos de prova cilíndricos de concreto para preparar os mesmos para o ensaio de resistência à compressão. O capeamento foi realizado para que os corpos de prova ficassem com as extremidades retas e lisas, afim de reduzir e evitar variações e irregularidades entre os corpos de prova e a prensa hidráulica usada no rompimento dos mesmos.

Figura 17: Máquina retificadora de corpos de prova.



Fonte: Autor, 2020.

Figura 18: Capeamento de corpos de prova.



Fonte: Autor, 2020.

3.6 Resistência a compressão

3.6.1 Ensaio de resistência a compressão

O ensaio de resistência a compressão é descrito pela NBR 5739/2018 (Concreto – Ensaio de compressão em corpos cilíndricos). O mesmo foi realizado 28 dias após o desmolde dos corpos de prova. O ensaio baseia-se no rompimento dos CP's a partir da

aplicação de tensões de compressão que são obtidas através de uma prensa hidráulica que aplica aos poucos carregamentos sobre o CP até atingir a sua carga de ruptura.

A resistência a compressão dos CP's pode ser obtida através da razão entre a carga de ruptura e a área de seção transversal do corpo de prova. A NBR 5739/2018 recomenda que o resultado deve ser demonstrado com a aproximação de 0,1 MPa.

A figura 19 mostra o ensaio de compressão realizado em um CP.

Figura 19: Rompimento de CP.



Fonte: Autor, 2020.

O rompimento dos corpos de prova foi realizado através de uma prensa hidráulica como mostra a Figura 20. Para o rompimento dos corpos de prova foi utilizado o Neoprene para uma melhor distribuição de tensão. Como também foi realizado o capeamento dos corpos de prova os mesmos tiveram cargas de ruptura parecidas e a maioria rompeu por cisalhamento.

Figura 20: Rompimento de corpo de prova através de prensa hidráulica com uso de Neoprene.



Fonte: Autor, 2020.

3.7 Absorção, índice de vazios e massa específica

O ensaio para a determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica é prescrito pela NBR 9778/2009. A norma prescreve o ensaio para a determinação da absorção por imersão e fervura, e das massas específicas de argamassas e concretos endurecidos (como é abordado neste trabalho).

As Figuras 21,22,23 e 24 mostram os CP's durante a realização deste ensaio.

Figura 21: Corpos de prova imersos em água para fervura.



Fonte: Autor, 2020.

Figura 22: CP's em estufa.



Fonte: Autor, 2020.

Figura 23: CP em Balança Hidrostática.



Fonte: Autor, 2020.

Figura 24: Balança Hidrostática utilizada no ensaio.



Fonte: Autor, 2020

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaio de resistência a compressão

O ensaio de compressão foi realizado com 6 corpos de prova de cada traço de concreto, totalizando assim no rompimento de 18 CP's. A Tabela 2 apresenta os resultados do ensaio.

Tabela 2: Dados do ensaio de resistência a compressão.

TRAÇO	CP	CARGA (TF)	TENSÃO (Mpa)
Referência (sem resíduo)	1	24,28	30,31
	2	26,00	32,48
	3	25,14	31,34
	4	24,19	30,19
	5	23,25	29,04
	6	20,57	25,73
5% de resíduo	1	16,43	20,51
	2	18,09	22,55
	3	19,33	24,08
	4	16,29	20,38
	5	17,44	21,78
	6	18,55	23,18
10% de resíduo	1	10,66	13,25
	2	10,76	13,38
	3	10,81	13,5
	4	10,78	13,5
	5	9,94	12,36
	6	10,28	12,87

Fonte: Autor, 2020.

Foi descartado o menor valor de cada ensaio, pois o mesmo fugiu das medidas centrais. Em seguida, foram calculados o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada tipo de concreto. A Tabela 3 mostra esses valores.

Tabela 3: Avaliação dos resultados obtidos no ensaio de compressão.

Corpo de prova (CP)	Tensão de compressão		
	Concreto de referência (CR)	5% de resíduo	10% de resíduo
1	30,31	20,51	13,25
2	32,48	22,55	13,38
3	31,34	24,08	13,5
4	30,19	21,78	13,5
5	29,04	23,18	12,87
Média	30,67	22,42	13,3
Desvio padrão	1,16	1,22	0,23
Coefficiente de variação	3,78	5,44	1,76
Avaliação	Muito bom	Razoável	Excelente

Fonte: Autor, 2020.

A avaliação presente na última linha da Tabela 3 foi realizada de acordo com a NBR 5739, essa norma apresenta a Tabela 4 para avaliação do ensaio do coeficiente de variação dentro do ensaio.

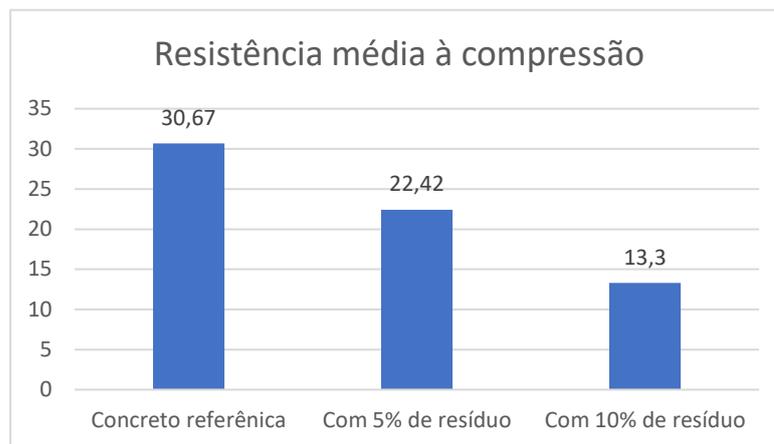
Tabela 4: Avaliação do ensaio do coeficiente de variação dentro do ensaio.

Coeficiente de variação (cv_e) %				
Nível 1 (Excelente)	Nível 2 (Muito bom)	Nível 3 (Bom)	Nível 4 (Razoável)	Nível 5 (Deficiente)
$cv_e \leq 3,0$	$3,0 < cv_e \leq 4,0$	$4,0 < cv_e \leq 5,0$	$5,0 < cv_e \leq 6,0$	$cv_e > 6,0$

Fonte: Adaptado da NBR 5739/2018, 2020.

Portanto, os resultados obtidos no ensaio de compressão indicaram que o ensaio realizado é confiável. Vale ressaltar que o incremento da borracha de pneu nos materiais a base de cimento resulta na diminuição da resistência a compressão como pôde ser observado com os resultados obtidos nesse trabalho. O Gráfico 1 mostra uma comparação das resistências médias obtidas para os 3 tipos de concreto.

Gráfico 1: Comparação das resistências médias de compressão.



Fonte: Autor, 2020.

Existem diversos estudos sobre essa redução na resistência a compressão. O Toutanji (1996, p.137) constatou que as reduções de resistência a compressão e a flexão em concretos com o incremento da borracha de pneu não ocorrem de forma linear. Para concretos com 25% de borracha de pneu em substituição parcial ao agregado miúdo, estas reduções foram em torno de 37,5% e 7,9%, respectivamente. Entretanto, com concretos onde foram implementados 75% de resíduo observou-se 68,7% de redução no valor da resistência à compressão e 26,3% no valor de resistência a flexão.

Turatsinze, Bonnet e Granju (2004, p.6) ao analisarem a microestrutura de concretos com resíduos de borracha de pneu, notaram a presença de uma zona de transição pasta de cimento-borracha fraca quando comparada com a pasta de cimento-areia. Para esses autores essa microestrutura em particular seria um fator adicional para o acontecimento da diminuição da resistência à compressão dos concretos com adição da borracha de pneu.

Fazendo uma análise dos dados do concreto de referência presente na coluna 2 da Tabela 3 verifica-se que os CP's do concreto de referência atingiram os valores de acordo com o traço para o qual foi dimensionado, o traço de 25 MPa. Visto que o seu valor de tensão final ficou de $(30,67 \pm 1,16)$ MPa.

Para o traço com incremento de 5% de resíduo de borracha de pneu, ocorreu uma redução de 26,9% da resistência a compressão quando comparado ao concreto de referência. Considerando o desvio padrão, tem-se um valor final para os CP's com 5% de resíduo de $(22,42 \pm 1,22)$ MPa.

Para o traço com incremento de 10% de resíduo de borracha de pneu ocorreu uma

redução ainda maior na sua resistência a compressão. Quando comparado ao concreto de referência, os CP's com 10% de resíduo tiveram uma redução de 56,64%. Logo, considerando o desvio padrão, tem-se um valor final para os CP's de 10% de resíduo de $(13,3 \pm 0,23)$ MPa.

4.2 Ensaio de determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Foram realizados os ensaios prescritos pela NBR 9778 para a determinação do nível de absorção de água e o índice de vazios. Para tal ensaio foram aferidos 3 CP's de cada traço de concreto, totalizado assim 9 CP's para a realização deste ensaio. Sendo eles: 3 CP's para o concreto de referência, 3 CP's com 5% de resíduo de borracha de pneu e 3 CP's com 10% de adição do mesmo resíduo.

4.2.1 Absorção de água por imersão (A)

O cálculo da absorção (em porcentagem), é dado através da Equação 1:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

m_{sat} = massa da amostra saturada após imersão e fervura

m_s = massa da amostra seca em estufa

4.2.2 Índice de vazios (I_v)

O cálculo do índice de vazios (em porcentagem) é dado através da Equação 2:

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

m_i = massa da amostra saturada imersa em água após fervura

4.2 Resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios do concreto com 5% de resíduo

A Tabela 5 mostra as massas das 3 amostras ensaiadas, suas massas tanto saturadas, após a imersão e fervura, quanto suas massas seca em estufa. A Tabela 6 apresenta a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

Tabela 5: Massas de amostras com adição de 5% de resíduos.

CP's com adição de 5% de resíduo		
Amostras	m_{sat}	m_s
CP1	3486g	3256g
CP2	3538g	3291g
CP3	3467g	3226g

Fonte: Autor, 2020.

Tabela 6: Massas de amostras com 5% de adição de resíduos.

CP'S com 5% de resíduo	
Amostras	m_i
CP1	2320,8g
CP2	2355,3g
CP3	2301,4g

Fonte: Autor, 2020.

A Tabela 7 mostra os resultados obtidos para o concreto com adição de 5% de resíduo.

Tabela 7: Resultados da absorção e índice de vazios para o concreto com 5% de resíduo.

CP	Absorção (%)	Índice de vazios (%)
1	7,06	19,74
2	7,51	20,88
3	7,47	20,68

Fonte: Autor, 2020.

A média entre as leituras registradas para a absorção foi de 7,35, o desvio padrão e o coeficiente de variação foi de 0,20 e 2,72% respectivamente. Resultando assim uma absorção de $7,35 \pm 0,20$. No índice de vazios foi registrada uma média de 20,43, o desvio padrão e o coeficiente de variação de 0,50 e 2,48 respectivamente. Representando $20,43 \pm 0,50$.

4.3 Resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios do concreto com 10% de resíduo

Analogamente, também foram ensaiados 3 CP's com adição de 10% de resíduo de borracha de pneu. A Tabela 8 mostra as massas das amostras ensaiadas. A Tabela 9 apresenta a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

Tabela 8: Massas de amostras com adição de 10% de resíduos.

CP's com adição de 5% de resíduo		
Amostras	m_{sat}	m_s
CP4	3276g	3027g
CP5	3199g	2962g
CP6	3227g	2981g

Fonte: Autor, 2020.

Tabela 9: Massas de amostras com 10% de adição de resíduos.

CP'S com 10% de resíduo	
Amostras	m_i
CP4	2086g
CP5	2026,1g
CP6	2041,3g

Fonte: Autor, 2020.

A Tabela 10 mostra os resultados obtidos para o concreto com adição de 10% de resíduo.

Tabela 10: Resultados da absorção e índice de vazios para o concreto com 10% de resíduo.

CP	Absorção (%)	Índice de vazios (%)
1	8,23	20,92
2	8,00	20,21
3	8,25	20,75

Fonte: Autor, 2020.

A média entre as leituras registradas para a absorção foi de 8,16, o desvio padrão e o coeficiente de variação foi de 0,11 e 1,35% respectivamente. Resultando assim uma absorção de $8,16 \pm 0,11$. No índice de vazios foi registrada uma média de 20,63, o desvio padrão e o coeficiente de variação de 0,30 e 1,45 respectivamente. Representando $20,63 \pm 0,30$. As tabelas 14 e 15 trazem dos índices obtidos nessa seção, demonstrando um aumento nesses índices quando comparados ao concreto de referência.

4.4 Resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios do concreto de referência

Seguindo os mesmos procedimentos anteriores, também foram ensaiados 3 CP's sem adição de resíduo, o concreto modelo. A Tabela 11 mostra as massas das amostras ensaiadas. A Tabela 12 apresenta a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

Tabela 11: Massas de amostras sem adição de resíduos.

CP's sem adição de resíduo		
Amostras	m_{sat}	m_s
CP7	3640g	3396g
CP8	3691g	3453g
CP9	3717g	3487g

Fonte: Autor, 2020.

Tabela 12: Massas de amostras sem resíduos.

CP'S sem resíduo	
Amostras	$m(i)$
CP7	2473,8g
CP8	2508,6g
CP9	2538g

Fonte: Autor, 2020.

A Tabela 13 mostra os resultados obtidos para o concreto de referência.

Tabela 13: Resultados da absorção e índice de vazios para o concreto de referência.

CP	Absorção (%)	Índice de vazios (%)
1	7,18	20,92
2	6,89	20,13
3	6,6	19,51

Fonte: Autor, 2020.

A média entre as leituras registradas para a absorção foi de 6,89, o desvio padrão e o coeficiente de variação foi de 0,24 e 3,44% respectivamente. Resultando assim uma absorção de $6,89 \pm 0,24$. No índice de vazios foi registrada uma média de 20,19, o desvio padrão e o coeficiente de variação de 0,58 e 2,87% respectivamente. Representando $20,19 \pm 0,58$.

As Tabelas 14 e 15 mostram os índices encontrados:

Tabela 14: Resumo dos Índices de Absorção.

Traço	Concreto de referência	5% de resíduo	10% de resíduo
Desvio Padrão	0,24	0,20	0,11
Coefficiente de Variação	3,44%	2,72%	1,35%
Absorção	6,89±0,24	7,35±0,20	8,16±0,11

Fonte: Autor, 2020.

Tabela 15: Resumo dos Índices de Vazios.

Traço	Concreto de referência	5% de resíduo	10% de resíduo
Desvio Padrão	0,58	0,5	0,30
Coefficiente de Variação	2,87%	2,48%	1,45%
Índice de vazios	20,19±0,58	20,43±0,50	20,63±0,30

Fonte: Autor, 2020.

Fazendo uma análise dos dados referentes aos Índices de Absorção e aos Índices de vazios, foi possível verificar um aumento nos mesmos devido ao incremento do resíduo de borracha de pneu. Esse fato está diretamente relacionado a diminuição da resistência a compressão ocorrida nos CP's.

De acordo com Neville (1997b, p.486) a absorção não pode ser uma medida de qualidade do concreto, no entanto ele ressalta que concretos de boa qualidade têm absorção bastante inferior a 10%. Martins (2005, p.110) analisou a Absorção por Imersão de amostras de Concreto de Alto Desempenho (CAD) com e sem a adição de resíduos de borracha de pneu, o CAD apresentou porcentagens menores de absorção que o CAD com a adição de borracha. De acordo com os índices encontrados neste trabalho, também foi possível observar um aumento nos Índices de Absorção quando incorporados percentuais de resíduos de borracha.

De acordo com Epps (1994), quando agregados de borracha são adicionados a mistura de concreto eles atraem o ar e repelem a água, de acordo com o pesquisador isso provoca o aumento no índice de vazios no concreto e pode ser um dos responsáveis pela redução na resistência do concreto.

4.5 Massa específica da amostra seca (ρ_s)

O cálculo da massa específica da amostra seca é dado através da Equação 3:

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (\text{Equação 3})$$

4.6 Massa específica da amostra saturada (ρ_{sat})

O cálculo da massa específica da amostra saturada é dado através da Equação 4:

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (\text{Equação 4})$$

4.7 Massa específica real (ρ_r)

O cálculo da massa específica real é dado através da seguinte Equação 5:

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (\text{Equação 5})$$

4.8 Resultados das massas específicas

A Tabela 16 mostra os resultados das massas específicas encontradas nos ensaios realizados.

Tabela 16: Massas específicas dos tipos de concretos ensaiados.

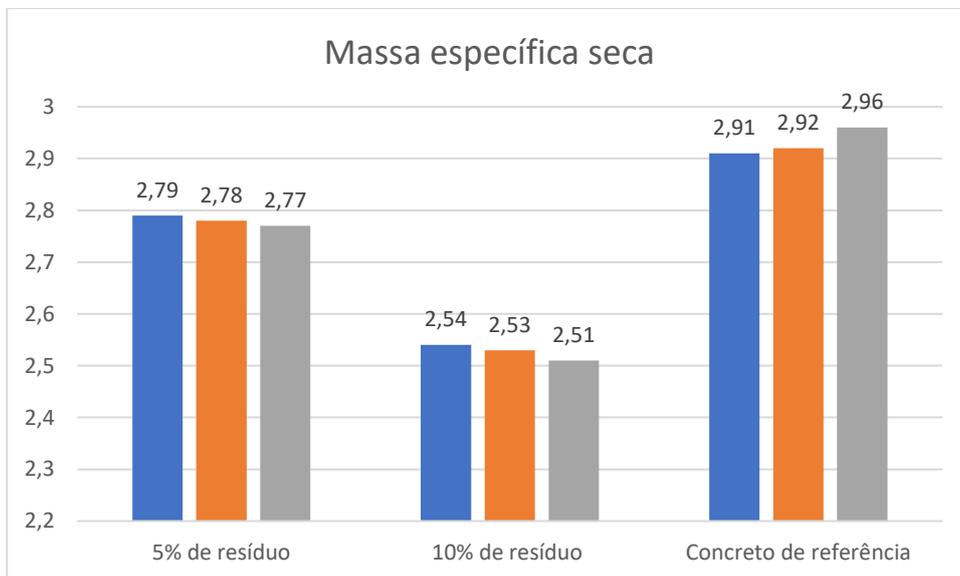
Massa específica	Tipo do concreto					
	Com 5% de resíduo		Com 10% de resíduo		Concreto de referência	
Massa específica seca (ρ_s)	CP1	2,79	CP4	2,54	CP7	2,91
	CP2	2,78	CP5	2,53	CP8	2,92
	CP3	2,77	CP6	2,51	CP9	2,96
Massa específica saturada (ρ_{sat})	CP1	2,99	CP4	2,75	CP7	3,12
	CP2	2,99	CP5	2,73	CP8	3,12
	CP3	2,97	CP6	2,72	CP9	3,15
Massa específica real (ρ_r)	CP1	3,48	CP4	3,22	CP7	3,68
	CP2	3,52	CP5	3,16	CP8	3,67
	CP3	3,49	CP6	3,17	CP9	3,67

Fonte: Autor.

De acordo com Neville (1997), concretos mal adensados apresentam vazios internos que diminuem a massa específica. O adensamento do concreto pode ter sua qualidade reduzida com a incorporação da borracha, e esse fato pode ter contribuído para a redução dos resultados encontrados para as massas específicas com adição do resíduo

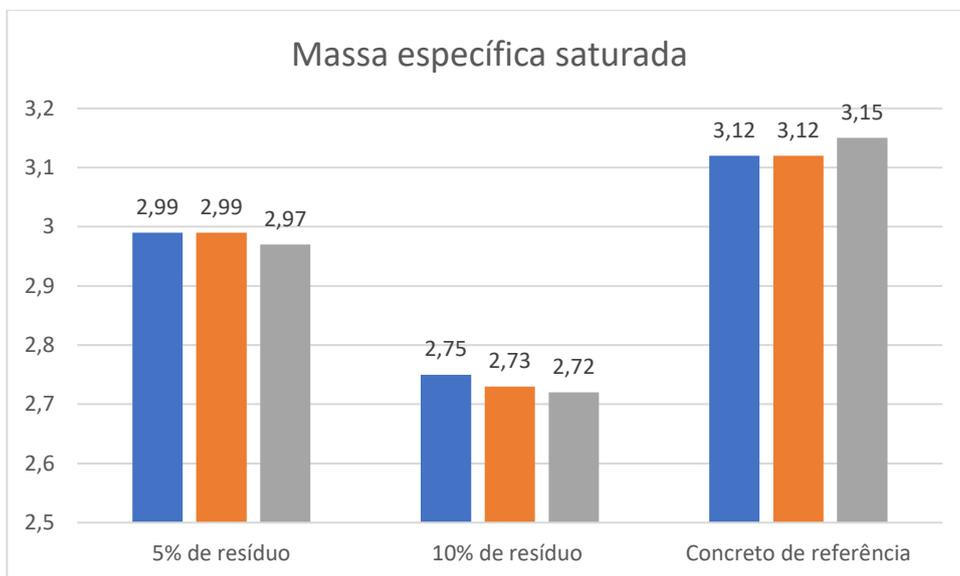
quando comparadas ao concreto de referência. Os Gráficos 2,3 e 4 mostram a comparação dos resultados referentes as massas específicas encontradas.

Gráfico 2: Comparação dos resultados da massa específica seca.



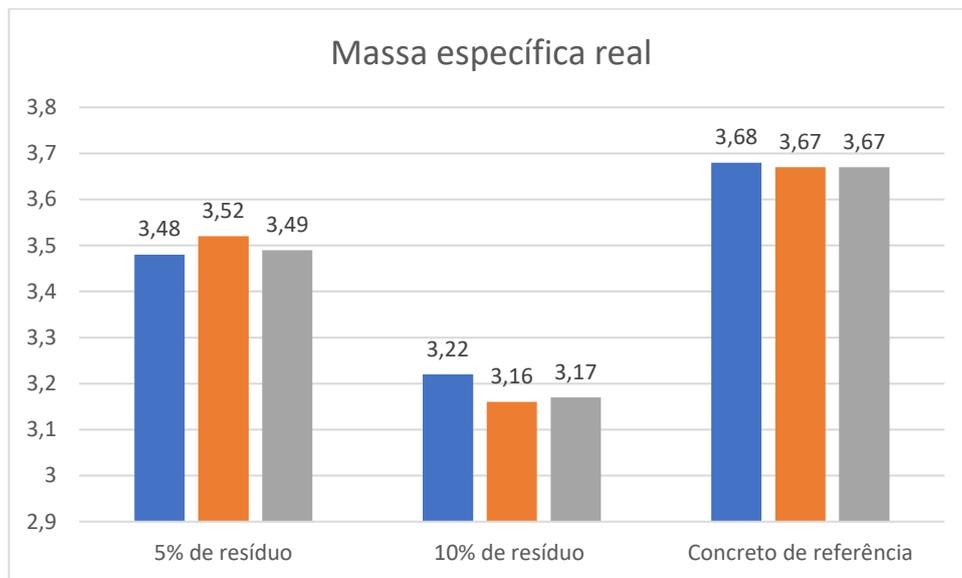
Fonte: Autor, 2020.

Gráfico 3: Comparação dos resultados da massa específica saturada.



Fonte: Autor, 2020.

Gráfico 4: Comparação dos resultados da massa específica real.



Fonte: Autor, 2020.

A massa específica é influenciada de forma direta quando durante o processo de mistura ou adensamento são gerados vazios que aprisionam o ar no concreto. Essas lacunas geradas acabam tornando o material menos denso comprometendo sua resistência mecânica.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como intuito a análise da influência do resíduo de borracha de pneus nas propriedades do concreto. Para tal foram realizadas metodologias para a análise de 3 diferentes traços de concreto, sendo eles: o traço de referência, um concreto com a adição de 5% de resíduo em relação a quantidade de cimento, e por fim, um concreto com 10% de adição desse resíduo em relação a quantidade de cimento.

Tendo em vista o embasamento teórico feito e os ensaios realizados, foi possível observar que como já era previsto por pesquisas realizadas que o acréscimo de resíduo de borracha de pneu ocasionou uma diminuição na resistência à compressão do concreto. Visto que, o incremento do resíduo proporcionou ao concreto uma zona de transição pasta de cimento-borracha fraca quando comparada com a pasta de cimento-areia. Diversos autores afirmam que essa microestrutura em particular seria um fator adicional para a acontecimento da diminuição da resistência à compressão dos concretos com adição da borracha de pneu.

Verificou-se também um aumento nos Índices de Absorção e de Vazios, o que também contribuiu para a diminuição da resistência a compressão. Os CP's com menores índices de vazios registraram maiores níveis de resistência a compressão. Dessa forma, o resíduo de borracha de pneu ocasionou mais vazios nos CP's aos quais foi adicionado, deve-se levar em consideração também que o tamanho das partículas do resíduo de borracha adicionada contribuiu para que isso ocorresse.

Também se verificou uma pequena redução nas massas específicas quando comparadas ao concreto de referência, pois durante o processo de mistura de concreto foram gerados mais vazios tornando o concreto menos densos, o que também contribuiu para a redução da resistência à compressão dos concretos com resíduos de pneu.

Em relação ao gerenciamento de resíduos, o atual cenário mostra a importância de cada vez mais serem reaproveitados materiais que antes eram descartados ao meio ambiente. Neste sentido, a pesquisa mostrou uma viabilidade para a utilização desse concreto para fins não estruturais, visto que o resíduo interfere na resistência do concreto.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros recomenda-se que:

- Testar com incrementos de resíduo: 2,3,4%...
- Testar resistência do concreto com o resíduo em pó.

- Testar resistência do concreto com o tamanho das partículas do resíduo de borracha menor que o do presente trabalho.
- Testar a resistência com um maior tempo de cura do concreto, como exemplo em 90 dias.
- Fazer uma análise da resistência a flexão do concreto após a adição do resíduo.
- Fazer uma análise da resistência a tração do concreto após a adição do resíduo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. ABCP. **Guia Básico de Utilização de Cimento Portland.** (Guia Técnico), ABCP, 7 ed São Paulo, 2002.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211/2009:** Agregados para concretos: Especificações. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738:** Concreto: Procedimentos para a moldagem e cura de copos-de-prova. Rio de Janeiro. 2018.

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

ADHIKARI, B.; DE, D.; MAITI, S. **Reclamation and recycling of waste rubber.** Materials Science Centre, Indian Institute of Technology, Kharagpur 721302, Indian. ELSEVIER -Progress in Polymer Science. 22 (2000) 909-948

AKASAKI, J. L. et al. **Avaliação da resistência à flexão do concreto com borracha de pneu com relação ao concreto convencional.** In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 45°, 2003, Vitória. *Anais...* Vitória: Ibracon, 2003. CD-ROM, Trabalho n° VI-004.

ALBUQUERQUE, A. C. et al. **Concreto com borracha de pneu: uma revisão bibliográfica.** In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 44°, 2002, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: Ibracon, 2002. CD-ROM.

BIGNOZZI, M. C.; SACCANI, A.; SANDROLINI, F. New polymer mortars containing polymeric wastes. Part 1. Microstructure and mechanical properties. *Composites, Part A: applied science and manufacturing*, v. part A 31, p.97-106, 2000.

BLUMENTHAL, M. Scrap Tire Market Analysis. *Biocycle: Journal of Waste*, (38:2) pp. 70-72, February 1997.

BNDES: **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social**. Pneus. BNDES: Áreas de Operações Industriais 2/ Gerência Setorial 2. Junho/1998. p. 01-34.

BNDES: **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Mercado Nacional de Pneumáticos**. BNDES: Áreas de Operações Industriais 2 AO2. Gerência Setorial do Complexo Automotivo. Março/2000. N.º 30. p. 01-07.

CONAMA: **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução N.º 258/99. Disponível em: <<http://www.lei.adv.br/258-99.htm>>. Acesso em 12/08/2020

DIAS, J. M. **Análise da influência de resíduos de vidro nas propriedades mecânicas do concreto**. 2019. 78 f. Monografia (Engenharia Civil). Universidade Federal de Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2019.

EPPS. NCHRP Synthesis of Highway Practice 108: Uses of Recycled Rubber Tires in Highways. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 162p. 1994.

GOODYEAR. **Charles Goodyear and the Strange Story of Rubber**. 1999. Disponível em < <https://corporate.goodyear.com/en-US/about/history/charles-goodyear-story.html> >. Acessado em 14/10/2019.

HEITZMAN, M. A. State of the Practice. **Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier**. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-AS-92-022, May. 1992.

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

LI, G. et al. **Development of waste tire modified concrete**. *Composites, Part B: engineering*, v.x, p.1-7, 2004.

LIU, H. S.; MEAD, J.L.; STACER R.G. Environmental Impacts of Recycled Rubber in Light Fill Applications: Summary & Evaluation of Existing Literature. Technical Report # 2 - CHELSEA Center for Recycling and Economic Development - University of Massachusetts. 1998.

LUND, H. F. The Mc Graw Hill Recycling Handbook. McGraw-Hill, Chapter 18, 1993

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

MENEGHINI, E. C. A. **Comportamento de argamassas com o emprego de pó de borracha,** Campinas, 2003. 101 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 2ª edição. Editora PINI. São Paulo, 1997.

NOVICKI, R.E.M. e MARTIGNONI, B.N.V. Retortagem de Pneus. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REÚSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS . PETROBRÁS-PR, 2000.

PARTES DE UM PNEU E SUAS FUNÇÕES. Terra, 2013. Disponível em: <<https://www.terra.com.br/economia/carros-motos/meu-automovel/conheca-todas-as-partes-de-um-pneu-e-suas-funcoes,e27429e46828f310VgnVCM20000099cceb0aRCRD.html>> Acesso em 12/09/2020.

PETROFLEX - 2001. Disponível em: <<http://www.petroflex.com.br>>

PIERCE, C. E.; BLACKWELL M. C. **Potential of scrap tire rubber as lightweight aggregate in flowable fill.** *Waste management*, v.23, p.197-208, 2003.

PIRELLI BRAZIL. Pneus, Informações técnicas. In Pirelli Home Page [online]. Disponível em: <<http://www.pirelli.com.br/pr/pneumatici/infotek/index.htm>> Acessado em: 14/09/2019

RESCHNER, K. An Overview of Commercially Available Scrap Tire Processing and Rubber Recycling Methods. April, 2002.

RHODIA BRASIL LTDA. **Uma nova geração de sílica para aplicação em pneus.** III Seminário de Atualidades em Tecnologia de Elastômeros. Porto Alegre. 25 – 26 Jun. 1998.

RMA: Rubber Manufacturers Association. Scrap Tire Management Council 1990-2000. Ten Years of Success. Disponível em: <<http://www.rma.org/scrap tires/pdf/brochure.pdf>> Acesso em: 06/09/2019

RUTH, B.E.; TIA, M.; JONSSON, G.; SETZE, J.C. **Recycling of Asphalt Mixtures Containing Crumb Rubber. Final Report.** FL/DOT/MO D510717. University of Florida. Florida Department of Transportation. 221p., 1997.

SILVA, Arthur. CASTRO, Vinicius. Tecnologia do pneu, fabricação, dimensionamento, aplicação. Universidade de Rio Verde. Disponível em <<http://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/Arthur%20%C3%89dico.pdf>> Acesso em 21/09/2020.

SEGRE, N.; MONTEIRO, P. J. M.; SPOSITO, G. Surface characterization of recycled tire rubber to be used in cement paste matrix. *Journal of colloid and interface science*, v.248, p.521-523, 2002.

SZPILMAN, M. Reciclagem. In: Instituto Ecológico AQUALUNG. Informativo n.º 23, jan/fev 1999. Disponível em: <www.uol.com.br/instaquainfo31.htm>. Acessado em: 21/10/2019.

TOUTANJI, H. A. The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. *Cement & Concrete Composites*, v.18, p.135-139, 1996.

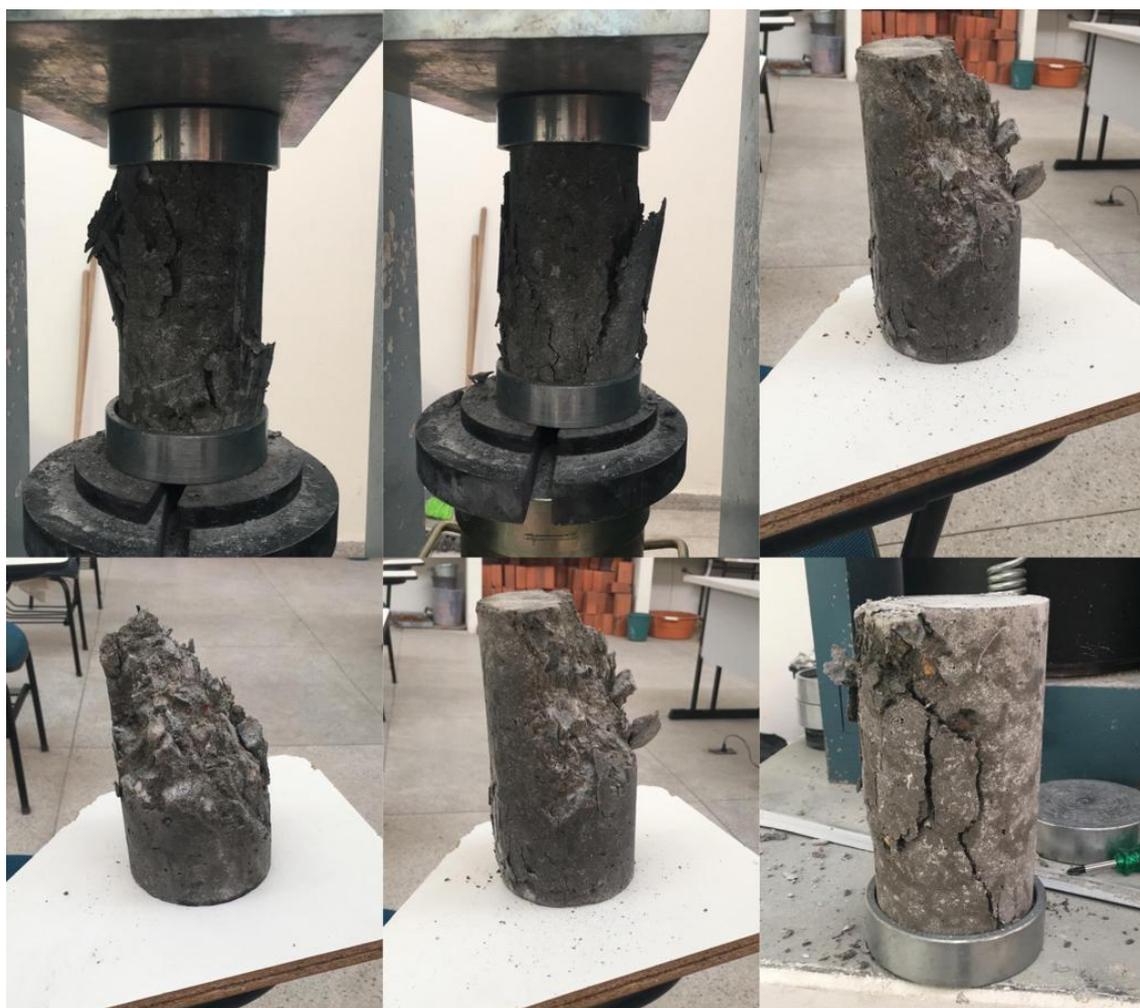
TURATSINZE, A.; BONNET, S.; GRANJU, J. L. Mechanical characterisation of cement based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres. *Building and environment*, p.1-6, 2004.

Apêndice A: CP's rompidos do concreto de referência.



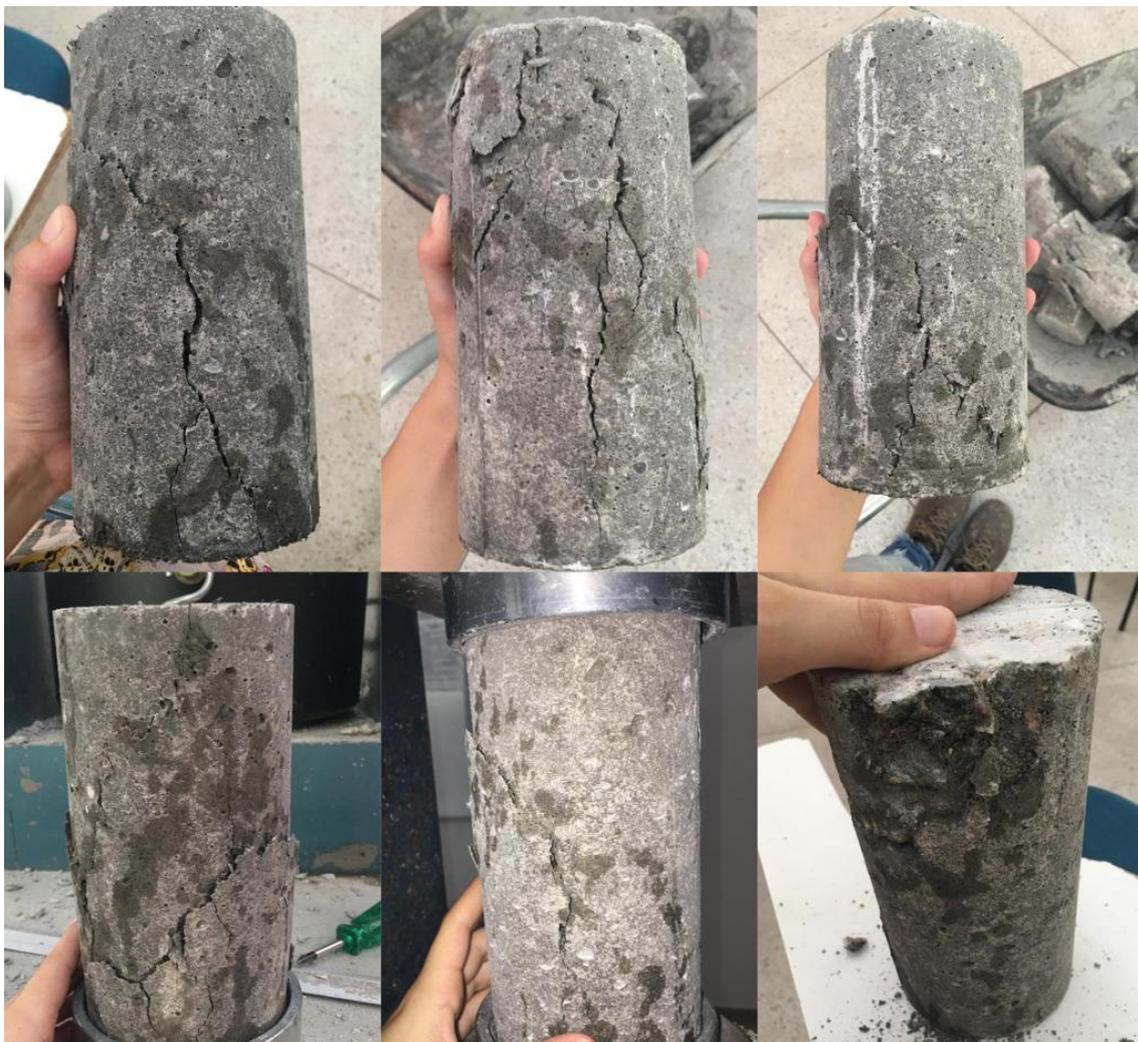
Fonte: Autor, 2020.

Apêndice B: CP's rompidos do concreto com 5% de resíduo de borracha de pneu.



Fonte: Autor, 2020.

Apêndice C: CP's rompidos do concreto com 10% de resíduo de borracha de pneu.



Fonte: Autor, 2020.

Apêndice D: CP's rompidos através da prensa hidráulica.



Fonte: Autor, 2020.