

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANDERSON LEFFA BAUER

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO COM INSERÇÃO DE
RESÍDUOS ORIUNDOS DE BORRACHA DE PNEU INSERVÍVEL**

São Leopoldo

2018

ANDERSON LEFFA BAUER

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO COM INSERÇÃO DE
RESÍDUOS ORIUNDOS DE BORRACHA DE PNEU INSERVÍVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Graduado em
Engenharia Civil, pelo Curso de
Engenharia Civil da Universidade do Vale
do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientadora: Prof.^a Ms. Fernanda Pacheco

São Leopoldo
2018

À Deus, que me dotou de sabedoria e vontade,
como também permitiu e abençoou toda minha luta.
Aos meus pais, meus irmãos e meus amigos que me
apoiaram e incentivaram nesta grande jornada.

AGRADECIMENTOS

Quero antes de tudo agradecer a Deus que fez com que tudo isso seja realidade, me guiando pelos caminhos tortuosos desta vida e me abençoando todos os dias com sua graça e misericórdia.

À minha família que direta ou indiretamente me suportou nesta jornada, sendo através do apoio financeiro, seja pelo incentivo ou pelo carinho e compreensão que recebo todos os dias.

À minha orientadora Fernanda que sempre se mostrou disposta a me ajudar, tornando este trabalho ainda melhor, fazendo esta pesquisa mais agradável e empolgante de se desenvolver.

Também agradeço a Camila Simonetti que me apoiou do início ao fim desta pesquisa.

Ao itt performance pela disponibilização do material e do laboratório, tornando assim possível os ensaios experimentais.

A empresa INDIBA que doou o agregado reciclado de borracha, elemento fundamental deste projeto.

Também a Coneresul que doou os demais agregados do concreto e o aditivo.

À equipe do LMC e do itt Performance que me ajudaram a executar as etapas do experimental deste estudo, em especial à Ingrid e o Igor.

Ao colega Anderson Batista pela parceria de pesquisa.

E a todos os demais que de alguma forma colaboraram no desenvolvimento deste trabalho.

“Recebei a instrução e não o dinheiro. Preferi a ciência ao fino ouro, pois a sabedoria vale mais que as pérolas e joia alguma a pode igualar.”
(BÍBLIA, Provérbios 8, 10-11).

RESUMO

O número de pneus comercializados no Brasil cresce anualmente, assim como a quantidade de pneus inservíveis, que descartados inadequadamente podem gerar sérios danos ao meio ambiente. Em paralelo, a construção civil é um dos setores da sociedade que tem um alto consumo dos recursos naturais. O estudo da adição de partículas de borracha provenientes da reciclagem de pneus inservíveis, em elementos de concreto, vem sendo objeto de investigação de muitos pesquisadores, uma vez que a incorporação deste resíduo pode melhorar características deste material, bem como trazer benefícios socioambientais e econômicos. Neste contexto, este estudo tem como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas do concreto com adição de borracha reciclada de pneu inservível, em duas diferentes granulometrias, substituindo o agregado miúdo nas proporções de 5%, 7,5% e 10% em volume. Foram realizados ensaios de abatimento do concreto no estado fresco, compressão simples, módulo de elasticidade, absorção de água por capilaridade, índice de vazios, massa específica, absorção total de água e velocidade de propagação de onda ultrassônica no estado endurecido. Os resultados obtidos apontaram para redução da trabalhabilidade no estado fresco para todos os traços. Também foi verificado o decréscimo da resistência à compressão e do módulo de elasticidade nos concretos com a adição do resíduo. A velocidade de propagação de onda ultrassônica aferida é compatível com os dados de resistência à compressão. A absorção capilar e absorção total de água demonstraram valores inferiores ao do concreto referência. A massa específica dos compósitos com resíduos de borracha se mostrou inferior ao concreto sem substituição. De forma geral, é possível evidenciar melhora das características dos concretos com agregado reciclado de borracha, apesar de ocorrer a diminuição de algumas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Concreto com resíduos de borracha. Reciclagem de borracha de pneu inservível. Sustentabilidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Queima de pneus a céu aberto	28
Figura 2 – Ciclo de produção e destinação do pneu	29
Figura 3 – Estrutura do pneu.....	31
Figura 4 – Microestrutura do concreto com borracha; (a) matriz de cimento com partículas de borracha (300x) e (b) interface borracha/concreto (500x).....	45
Figura 5 – Etapa I do programa experimental	49
Figura 6 – Etapa II do programa experimental	50
Figura 7 – Amostras para ensaio de absorção de água por capilaridade	60

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Granulometrias do ARB (a) 0,7 a 2mm, (b) 1 a 4mm	54
Fotografia 2 – Visual das amostras	57
Fotografia 3 – Retificação da amostra.....	58
Fotografia 4 – Realização do ensaio de resistência à compressão.....	59
Fotografia 5 – Amostras para o ensaio de absorção de água por capilaridade	60
Fotografia 6 – Etapas do ensaio de massa específica, índice de vazios e absorção de água	61
Fotografia 7 – Preparo da amostra e verificação da propagação das ondas ultrassônicas	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Composição de pneu radial de automóvel.....	33
Gráfico 2 – Destinação de pneus inservíveis	35
Gráfico 3 – Volumes de pneus inservíveis coletado e destinado pela Reciclanip (em mil toneladas) ao longo do tempo	37
Gráfico 4 – Evolução dos pontos de coleta de pneu inservíveis no Brasil	37
Gráfico 5 – Relação entre perda relativa de massa específica e teor de borracha ...	42
Gráfico 6 – Variação do teor de ar incorporado em função da adição de borracha ..	43
Gráfico 7 – Valores do teste de abatimento de amostras de concreto fresco	44
Gráfico 8 – Resistência à fadiga.....	47
Gráfico 9 – Carga passante em função do teor de adição de borracha	48
Gráfico 10 – Granulometria do Cimento CP-IV 32	51
Gráfico 11 – Abatimento do tronco de cone	64
Gráfico 12 – Valores médios obtidos de resistência à compressão	66
Gráfico 13 – Valores médios obtidos de módulo de elasticidade aos 28 dias	68
Gráfico 14 – Taxa de absorção aos 7 dias	70
Gráfico 15 – Taxa de saturação aos 7 dias	71
Gráfico 16 – Taxa de absorção aos 28 dias	72
Gráfico 17 – Taxa de saturação aos 28 dias	73
Gráfico 18 – Absorção efetiva e resistência mecânica à compressão	74
Gráfico 19 – Resultados obtidos de absorção de água	75
Gráfico 20 – Resultados obtidos de índice de vazios	76
Gráfico 21 – Resultados obtidos de massa específica real	77
Gráfico 22 – Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	78
Gráfico 23 – Resistência mecânica à compressão e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constituintes perigosos dos pneus.....	33
Tabela 2 – Massa unitária e massa específica do agregado graúdo: brita	52
Tabela 3 – Granulometria do agregado graúdo.....	52
Tabela 4 – Massa unitária e massa específica do agregado miúdo: areia.....	53
Tabela 5 – Granulometria do agregado miúdo	53
Tabela 6 – Massa unitária e massa específica do agregado miúdo: ARB	54
Tabela 7 – Granulometria do ARB granulometria 0,7-2mm	55
Tabela 8 – Granulometria do ARB granulometria 1-4mm	55
Tabela 9 – Dosagens unitárias (em massa) empregadas na produção dos concretos..	56
Tabela 10 – Abatimento do tronco de cone e características das moldagens	63
Tabela 11 – Valores obtidos de resistência à compressão	65
Tabela 12 – Valores médios obtidos de módulo de elasticidade aos 28 dias	67
Tabela 13 – Valores obtidos no ensaio de absorção por capilaridade	69
Tabela 14 – Qualidade do concreto em relação a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas - Cánovas (1988) e IS 13311 (1992)	80

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
ARB	Agregado Reciclado de Borracha
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ECHA	<i>European Chemicals Agency</i>
ETRMA	<i>European Tyre & Rubber Manufacturers' Association</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INDIBA	Industrial Batistella de Artefatos de Borracha Ltda.
IS	<i>Indian Standard</i>
LASE	Laboratório de Segurança Estrutural
LMC	Laboratório de Materiais de Construção
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
Pef	Absorção capilar efetiva
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
R	Resistência capilar
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
S	Taxa de absorção capilar
VUS	Vida Útil de Serviço
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
WRAP	<i>Waste & Resources Action Programme</i>

SUMÁRIO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA.....	23
1.2 JUSTIFICATIVA	24
1.3 OBJETIVOS	25
1.3.1 Objetivo Geral.....	25
1.3.2 Objetivos Específicos	25
1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	26
1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA	26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 PNEU INSERVÍVEL	27
2.1.1 Problemática Ambiental.....	27
2.1.2 Legislação.....	30
2.1.3 Estrutura do Pneu	31
2.1.4 Caracterização do Resíduo de Pneu Inservível	32
2.1.5 Procedimento de Reciclagem e Reaproveitamento	34
2.1.6 Possíveis Destinações do Pneu Inservível	35
2.1.7 Geração de Resíduos Provenientes de Pneus Inservíveis	36
2.2 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO	38
2.2.1 Concreto com Utilização de RCD.....	38
2.2.2 Concreto com Utilização de Resíduos de Outros Setores	39
2.3 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO COM INSERÇÃO DE BORRACHA DE PNEU INSERVÍVEL	40
2.3.1 Características no Estado Fresco.....	41
2.3.2 Características no Estado Endurecido.....	44
2.3.3 Características de Durabilidade.....	47
3 MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1 ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	50
3.2.1 Cimento	50
3.2.2 Agregado Graúdo	51
3.2.3 Agregado Miúdo	52
3.2.4 Agregado Reciclado de Borracha.....	53
3.2.5 Aditivo Superplastificante	56

3.2.5 Água	56
3.3 MÉTODOS DE DOSAGEM	56
3.4 MÉTODOS DE ENSAIO	57
3.4.1 Estado Fresco	57
3.4.2 Estado Endurecido	58
3.4.2.1 Resistência Mecânica à Compressão.....	58
3.4.2.2 Módulo de Elasticidade	59
3.4.2.3 Absorção de Água por Capilaridade	59
3.4.2.4 Índice de Vazios, Massa Específica e Absorção Total de Água	61
3.4.2.5 Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica.....	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 ESTADO FRESCO	63
4.2 ESTADO ENDURECIDO	65
4.2.1 Resistência Mecânica à Compressão	65
4.2.2 Módulo de Elasticidade	67
4.2.3 Absorção de Água por Capilaridade	68
4.2.4 Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica	75
4.2.5 Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica	78
5 CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS	85
APÊNDICE A – SÍNTESE DOS RESULTADOS	97

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Há uma tendência atual de se promover o desenvolvimento respeitando-se a sustentabilidade, enfatizada pela procura por materiais alternativos em todos os setores comerciais somada ao estímulo do estudo do consumo racional dos recursos naturais e o seu reaproveitamento, reduzindo seu impacto. (SILVA JÚNIOR, 2014).

Almeida (2015) destaca que os danos percebidos na má gestão dos resíduos se caracterizam como de saúde pública, podendo intervir no direito à vida. Ainda segundo a autora, isso ocorre, pois, os resíduos são um dos maiores responsáveis pela poluição ambiental mundial. Além disso, o mal gerenciamento dos resíduos sólidos acarreta no não aproveitamento do seu potencial de reciclagem e reuso e a sua disposição incorreta gera degradação e poluição do meio ambiente. (MEHERIER, 2016).

Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2017), em 2016 foram gerados 78,3 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em todo o país, sendo coletado 91% deste montante, tendo então 9% com destinação imprópria. Destaca-se ainda que desta porção coletada cerca de 59%, ou 41,7 milhões de toneladas, foram enviadas para aterros sanitários.

Dentre tantos resíduos produzidos pela população, os pneus vêm se destacando, dado que sua disposição em aterros sanitários gera grandes volumes, acrescido ao fato de que este material apresenta uma decomposição muito lenta. (GIACOBBE, 2008). O seu descarte incorreto pode agravar os impactos sanitários e ambientais, visto que estes resíduos colaboram para a degradação da natureza e a proliferação de doenças como a dengue e a febre amarela. (ALVES et al., 2015). A Associação Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE) (2017) acrescenta que a queima de pneus pode liberar substâncias nocivas como o dióxido de enxofre (SO₂) e metais pesados, ressaltando ainda que seu descarte incorreto pode agravar as enchentes.

A construção civil desempenha um papel relevante no crescimento econômico e social da humanidade, porém, quando avaliamos este setor do ponto de vista ambiental, nos deparamos com resultados um tanto insatisfatórios, o que acaba

gerando uma necessidade de mudança, para que sejam adotadas práticas mais sustentáveis nas suas atividades. (PELISSARI, 2016).

Behera et al. (2014) afirmam que a construção civil, frente ao grande impacto ambiental gerado neste setor, deve tender a reciclar, reutilizar e usar materiais alternativos em prol de reduzir o consumo de matéria-prima virgem, o consumo de energia, a geração de poluição, a disposição do lixo e o aquecimento global, contribuindo para um comportamento mais sustentável do setor como um todo, de elevada relevância.

Desta forma, visando desempenhar uma engenharia sustentável a construção civil está promovendo estudos do emprego de resíduos sólidos, criando possibilidades de reciclagem de materiais, atribuindo novas propriedades ao concreto e contribuindo também para a redução do volume de despejos de lixos que ocasionam impactos na saúde pública e no meio ambiente. (FAZZAN; PEREIRA; AKASAKI, 2016; SÃO THIAGO, 2017).

Muitas pesquisas foram desenvolvidas com o intuito de compreender o comportamento do concreto com adição de borracha de pneu inservível e no geral mostraram que a resistência à compressão, resistência à tração e o módulo de elasticidade são propriedades afetadas negativamente. (BIGNOZZI; SANDROLINI, 2006; GUO et al., 2017; SU et al., 2015). Contudo, Meherier (2016) por exemplo, obteve concretos com borracha com resistências à compressão superiores a 30 MPa, para substituições do agregado miúdo nas proporções de 10% e 20% em volume, tendo o concreto referência como meta 35MPa, o que mostra que ainda assim é possível usar este material para fins estruturais.

Ao considerar este cenário, de interesse na utilização de resíduos, acrescido à garantia de propriedades específicas nos concretos, este estudo realizou a análise das propriedades físicas e mecânicas do concreto modificado com inserção de agregados de pneus inservíveis.

1.2 JUSTIFICATIVA

Farhan, Dawson e Thom (2016) dizem que muitos autores se empenharam ao longo dos anos em minimizar o problema da disposição de resíduos e com isso também preservar os recursos naturais. Os autores ainda salientam que estes são dois grandes problemas da contemporaneidade.

Pinto et al. (2017) contam que os pneus inservíveis sempre causaram problemas ambientais, porém, enfatizam que foi o aumento expressivo da frota de veículos nas últimas décadas, que veio a ocasionar impactos significantes e a partir de então, teve-se a preocupação de tratar estes resíduos com mais cautela.

A disposição de resíduos provenientes de pneus em aterros sanitários é problemática. Em função disso, tem se estudado este material com o objetivo de reciclar e fazer reuso para diversas aplicações. (MEHERIER; ALAM; BANTHIA, 2015).

De forma a obter determinadas características para o concreto, como por exemplo uma maior ductibilidade e um menor peso específico, faz-se então estudos de avaliação da incorporação de materiais que possibilitam conferir ao concreto a melhoria de algumas propriedades. (SANTOS, 2005).

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho dividem-se em objetivo geral e objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar as propriedades físicas e mecânicas do concreto com inserção de resíduos oriundos de borracha de pneu inservível.

1.3.2 Objetivos Específicos

Neste trabalho têm-se os seguintes objetivos específicos:

- a) verificar a trabalhabilidade de concretos contendo resíduo de borracha, bem como analisar as propriedades físicas e mecânicas do concreto com diferentes teores de substituição e diferentes granulometrias de borracha, verificando se há relação entre o percentual utilizado e os efeitos percebidos nas propriedades.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho delimita-se à análise das propriedades do concreto de resistência mecânica à compressão, módulo de elasticidade estático, velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, absorção de água por capilaridade, índice de vazios, massa específica e absorção total de água. Foram avaliados os percentuais de 5%, 7,5% e 10% de inserção de agregados de pneus em substituição aos agregados naturais, em volume, sendo utilizadas duas granulometrias diferentes. A substituição ocorreu com os agregados miúdos, não sendo alterados os agregados graúdos na composição. Apenas uma composição de concreto foi alterada em relação às substituições do agregado. O estudo foi realizado conforme normas e regulamentações vigentes.

1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa está dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo, estão inseridos a contextualização do tema, a justificativa, os objetivos a serem alcançados, as delimitações do trabalho e a estrutura da pesquisa. No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica realizada sobre aspectos pertinentes ao tema, como informações importantes relativo aos pneus inservíveis, utilização de resíduos na composição do concreto e as características do concreto com a utilização do resíduo reciclado de pneus inservíveis, expondo estudos já desenvolvidos com tal temática. O capítulo 3 descreve as etapas do programa experimental, onde são determinadas as variáveis estudadas, bem como os procedimentos necessários para obtenção dos resultados. Também são apresentadas propriedades e características dos materiais utilizados. No capítulo 4 são contemplados os resultados encontrados na etapa experimental, assim como as análises referentes a eles. No capítulo 5 é apresentada as conclusões alcançadas a partir dos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PNEU INSERVÍVEL

Para Granzotto (2010), a alta quantidade de resíduos sólidos provindos da indústria de borracha tem fomentado a pesquisa acerca da reciclagem e reutilização deste material. A autora, afirma ainda, que embora já existam algumas boas alternativas para destinação deste resíduo, há muito que se aprimorar, visto que o consumo deste material tem crescido constantemente.

Gomes Filho (2007) alega que o ato de reciclar é uma solução criativa que otimiza os recursos econômicos, preserva o meio ambiente e melhora a qualidade de vida da humanidade. O autor complementa, afirmando que o estudo do aproveitamento dos resíduos provenientes de pneus inservíveis é de suma importância para dar destinação adequada a este material, bem como preservar as reservas naturais de borracha.

Chamam-se de pneus inservíveis aqueles cuja vida útil chegou ao fim e não apresentam mais condições de utilização para circulação ou reforma e precisam ser descartados corretamente a fim de evitar danos ao meio ambiente. (CEMPRE, 2017).

No Brasil, as formas mais comuns do reaproveitamento de pneus inservíveis são como combustível alternativo nas indústrias de cimento, na fabricação de asfalto-borracha, manta asfáltica, solados de sapatos, borrachas de vedação, dutos pluviais, pisos de quadras poliesportivas, pisos industriais e tapetes de automóveis. (GRANZOTTO, 2010).

2.1.1 Problemática Ambiental

Carvalho (2007) aponta que o pneu é um produto insubstituível na atualidade, desempenhando um papel primordial para a movimentação do veículo. Segundo Ganjian, Khorami e Maghsoudi (2009), houve, nas últimas décadas, um crescimento mundial na indústria automobilística, assim como um aumento do uso do carro como principal meio de transporte, acarretando num acréscimo demasiado do número de produção de pneus, gerando grandes estoques de pneus usados.

Cerca de 70% da produção nacional de borracha é utilizada para a produção de pneus e câmaras de ar, portanto, a sua reciclagem é importante para a preservação

dos recursos naturais. (CEMPRE, 2017). Granzotto (2010) acrescenta que a estrutura do pneu é de difícil degradação, podendo este processo levar de 400 a 800 anos, o que o torna problemático para ser descartado em aterros sanitários.

Parra, Nascimento e Ferreira (2010) afirmam que além do pneu inservível não ser biodegradável, a sua composição e a dificuldade de compactação deste material, também são fatores que colaboram para a redução da vida útil dos aterros sanitários. Os autores complementam, afirmando que por causa da forma do pneu, este tende a reter gases em seu interior o que o leva a subir para a superfície e conseqüentemente romper a camada de cobertura, permitindo a evasão dos gases e atraindo insetos, roedores e pássaros, além de propiciar a entrada de água que leva ao aumento da formação de chorume.

Veloso (2010) afirma que o pneu inservível é um empecilho para o meio ambiente, pois são anualmente geradas grandes quantidades do resíduo, sendo muitos deles dispostos erroneamente, acarretando na intensificação de problemas de assoreamento e enchentes. Juntamente com a autora, Mattioli et al. (2009) alertam que além da geração de gases tóxicos, a queima deste material também produz cinzas e uma fração líquida composta por hidrocarbonetos mais pesados que podem vir a contaminar o lençol freático. A agressividade da queima de pneus a céu aberto causados ao meio ambiente pode ser claramente percebida na Figura 1.

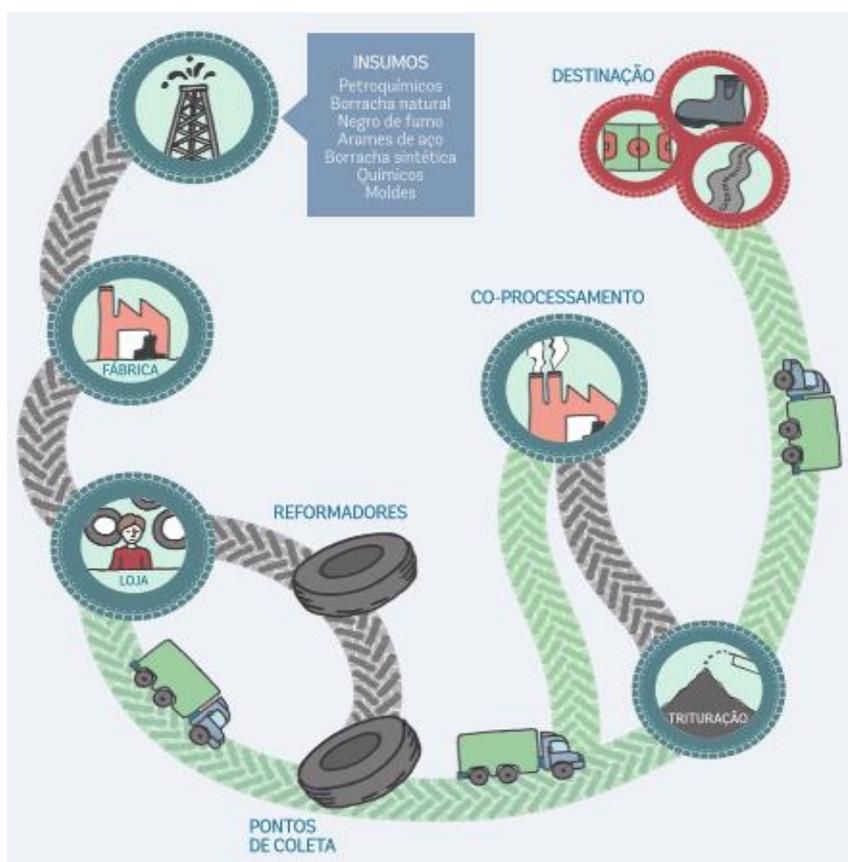
Figura 1 – Queima de pneus a céu aberto



Fonte: Nicácio (2016).

Os pneus inservíveis, além de poderem funcionar como criadouros e abrigo para vetores de doenças como a dengue, quando descartados inadequadamente, podem também ser responsáveis por disseminar doenças para outros locais através do transporte deste resíduo. (VELOSO, 2010; *UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME* (UNEP), 2011). A Figura 2 lustra o ciclo de vida ambientalmente adequado do pneu.

Figura 2 – Ciclo de produção e destinação do pneu



Fonte: Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) (2015, p. 29).

Nota-se na Figura 2 a importância da logística reversa para evitar a disposição deste resíduo em aterros sanitários, podendo servir de matéria prima para outros materiais ou processos.

Para Fazzan, Pereira e Akasaki (2016) os problemas dos aterros sanitários e de saúde pública ocasionados pela má gestão dos pneus inservíveis são consequência direta de legislações deficientes e ausência de incentivos para reciclagem. Entretanto, Lagarinhos e Tenório (2013) afirmam que não só a população, mas também as empresas estão se conscientizando sobre a preservação do meio

ambiente e da saúde pública, colaborando assim para o desenvolvimento de políticas sustentáveis.

2.1.2 Legislação

Com base na Lei nº 6.938 sancionada em 31 de agosto de 1981, atribui-se ao Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) o poder de normatizar e estabelecer critérios para o licenciamento de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras. (BRASIL, 1981). Em 1999, foi aprovada a primeira Resolução nº 258 do CONAMA que trata especificamente da destinação final dos pneumáticos (CONAMA, 1999), que foi alterada em 2002 com a Resolução nº 301. Esta, proibiu a disposição final de pneus inservíveis em aterros sanitários, mares, rios, lagos ou riachos, terrenos baldios ou alagadiços, e a queima a céu aberto, além de determinar que as empresas e fabricantes de pneus são responsáveis por coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis. (CONAMA, 2002).

Posteriormente, no ano de 2009, foi validada a nova Resolução nº 416, revogando as versões anteriores, e tendo agora novo embasamento que dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental decorrente de pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada. Este documento estabelece que os fabricantes e importadores de pneus novos devem implantar pelo menos um ponto de coleta para os municípios com mais de 100 mil habitantes e dar destinação ambientalmente correta para um pneu inservível a cada pneu produzido para o mercado de reposição. (CONAMA, 2009).

A Resolução nº 416 define destinação ambientalmente adequada de pneus inservíveis como:

Procedimentos técnicos em que os pneus são descaracterizados de sua forma inicial, e que seus elementos constituintes são reaproveitados, reciclados ou processados por outra(s) técnica(s) admitida(s) pelos órgãos ambientais competentes, observando a legislação vigente e normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, e a minimizar os impactos ambientais adversos. (CONAMA, 2009).

No ano seguinte, em 2 de agosto de 2010, foi aprovada a Lei Federal nº 12.305 que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010b), que em 23 de dezembro de 2010, foi publicado o decreto nº 7.404 que a regulamenta. (BRASIL, 2010a). Almeida (2015) aponta a PNRS como uma ferramenta do âmbito jurídico de suma importância para poder ser realizado um controle e gerenciamento

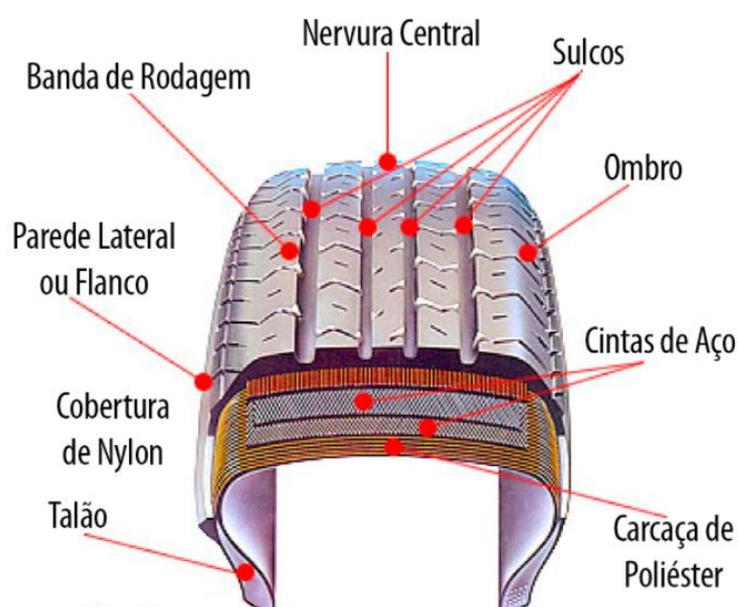
dos resíduos sólidos produzidos no Brasil. Acrescenta ainda que posta está lei, além dos ganhos ambientais, os resíduos sólidos passam também a serem oportunos do ponto de vista do mercado financeiro.

De acordo com a Lei Federal nº 12.305 (BRASIL, 2010b), a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos devem ser ações a serem introduzidas na gestão de resíduos, estabelecendo também a logística reversa como uma das metodologias de implementação do princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Desta forma, se propicia a viabilização da coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, tendo em vista o seu reaproveitamento em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente apropriada, de modo a minimizar os impactos no meio ambiente e na saúde pública, melhorando a qualidade de vida da sociedade.

2.1.3 Estrutura do Pneu

O pneu é composto por diferentes componentes como borracha, aço, nylon ou poliéster (MATTIOLI, 2009) e sua estrutura é ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Estrutura do pneu



Fonte: Palmeira (2015).

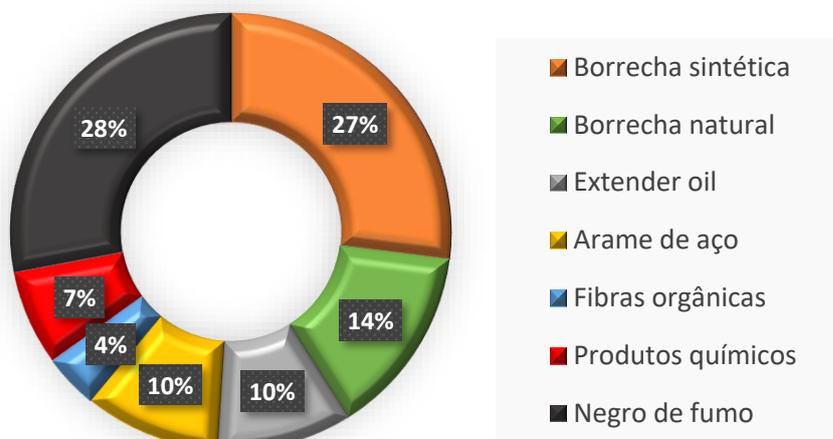
Conforme Bridgestone (2016), a seguir estão descritas as principais partes de um pneu:

- a) banda de rodagem: é a parte do pneu que faz contato com o solo, oferecendo aderência, tração, estabilidade e segurança ao veículo;
- b) sulcos: estes servem para drenar a água e reduzir os ruídos;
- c) ombro: sujeito a desgastes excessivos, pois recebem grandes solicitações durante a execução das curvas;
- d) parede lateral ou flanco: revestida com borracha diferenciada para ter mais resistência à fadiga, ao envelhecimento e a abrasão;
- e) talão: constituído por fios de aço banhados por cobre e revestidos com borracha para facilitar a adesão e evitar a oxidação, tem a função de fixar o pneu na roda, bem como evitar o vazamento de ar;
- f) cintas de aço: formado por fios de aço, compreende o feixe de cintas (cintas estabilizadoras), tem função de garantir a estabilidade na zona de rodagem, proteger a carcaça de impactos e perfurações e restringir o diâmetro do pneu;
- g) carcaça: é a estrutura resistente do pneu, formada por cordonéis de poliéster, nylon ou aço, que recebem uma camada de borracha para aumentar a adesão e o atrito interno, esta resiste à pressão, choques e o peso do veículo.

2.1.4 Caracterização do Resíduo de Pneu Inservível

A ANIP (2013) explica que o pneu, desempenhando um papel crucial para o movimento do carro, é fabricado através de processos e combinações de matérias-primas como a borracha natural, borracha sintética, negro de fumo, cabos de aço, cordonéis de aço ou náilon e produtos químicos como o enxofre. Ainda segundo a associação, para a fabricação dos variados tipos de pneus, a proporção de cada matéria-prima é ajustada para conferir ao produto as características desejadas, como a variação da proporção de borracha natural no pneu de automóvel de passeio e de caminhão, sendo neste último empregado uma maior porção de borracha natural a fim de lhe atribuir maior resistência aos cortes e lacerações. No Gráfico 1 é demonstrada a composição do pneu radial de automóvel.

Gráfico 1 – Composição de pneu radial de automóvel



Fonte: Adaptado de Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDS) (1998).

Conforme o Gráfico 1, a composição é baseada predominantemente em borracha sintética e negro de fumo. Este último é um componente originado da combustão incompleta de derivados de petróleo e quando adicionados a composição do pneu aumenta a resistência mecânica e à reação dos raios ultravioleta, garantindo maior durabilidade e desempenho. (SANTIN et al., 2007).

O pneu, por conter no seu extrato solubilizado teores de metais (zinco e manganês), como é apresentado na Tabela 1, superiores aos padrões estabelecidos na ABNT NBR 10.004:2004, o mesmo é classificado como Classe II A – não inertes. (PINTO et al., 2017). No entanto, o UNEP (2011) afirma que as propriedades dos pneus não são perigosas a saúde humana.

Tabela 1 – Constituintes perigosos dos pneus

Substância	Conteúdo (% massa)
Composto de Cobre	Aprox. 0,02%
Composto de Zinco	Aprox. 1%
Cádmio	Max. 0,001%
Composto de Chumbo	0,005%
Soluções ácidas ou ácidos na forma sólida	Aprox. 0,3%
Composto organoclorados	Conteúdo de halogênios max. 0,1%

Fonte: Adaptado de UNEP (2011, p. 18, tradução nossa).

2.1.5 Procedimento de Reciclagem e Reaproveitamento

Conforme a Resolução Conama nº 416/2009, há três maneiras para reformar o pneu:

- a) recapagem: processo pelo qual um pneu usado é reformado pela substituição de sua banda de rodagem;
- b) recauchutagem: processo pelo qual um pneu usado é reformado pela substituição de sua banda de rodagem e dos ombros;
- c) remoldagem: processo pelo qual um pneu usado é reformado pela substituição de sua banda de rodagem, ombros e toda a superfície de seus flancos. (CONAMA, 2009).

Silva Júnior et al. (2016) afirmam que o processo de recauchutagem é uma das alternativas de reúso do pneu mais utilizado, no qual neste processo é aproveitado a estrutura resistente do pneu, que deve estar em bom estado de conservação, realizando a raspagem da banda de rodagem remanescente para então receber a nova camada, gerando assim um resíduo fibrilar de diversas dimensões que pode ser utilizado para outras aplicações.

O processo de recauchutagem se torna uma ótima opção visto que este método tem efeitos significantes quanto a preservação dos recursos naturais e a redução das emissões de gás carbônico (CO₂), pois são necessárias maiores quantidades de matéria prima e energia para a fabricação de um pneu novo. (*European Tyre & Rubber Manufacturers' Association* (ETRMA), 2017; GOMES FILHO, 2007). Santos (2012) ressalta que os processos de reforma não eliminam os problemas de disposição do pneu inservível e sim prolongam a vida de uso das carcaças que estão em boas condições, atenuando os impactos ao meio ambiente e contribuindo para a redução dos custos de transportes.

Já o processo de trituração e moagem do pneu inservível, conforme Reschner (2008), constituem uma forma de disposição deste material que o torna mais acessível e fácil a sua aplicabilidade em outros setores, em razão de que nesta operação faz-se a separação das fibras contidas no pneu, tanto de aço quanto de têxteis, da borracha.

European Chemicals Agency (ECHA) (2017), Reschner (2008) e *Waste & Resources Action Programme* (WRAP) e *Environmental Agency* (2007) explicam que há duas principais maneiras de realizar este processo de trituração e moagem, sendo a primeira através da trituração e separação gradual, ocorrendo em várias etapas e em temperatura ambiente, e a segunda, utilizando nitrogênio para resfriar os pneus inservíveis ou parte deles a uma temperatura abaixo de -120°C, onde a seguir a

borracha é cortada e reduzida ao tamanho especificado, este último processo é conhecido como criogênico. (RESCHNER, 2008).

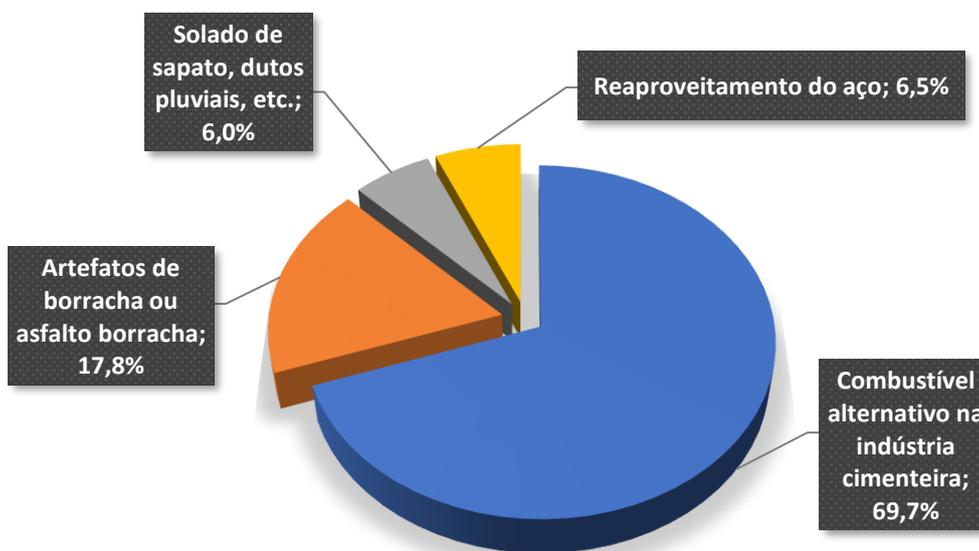
A diferença principal entre estes métodos de trituração acima apresentados é basicamente o emprego de hidrogênio, onde ao mesmo tempo que facilita a separação dos materiais constituintes do pneu, aumenta os custos deste processo. (RESCHNER, 2008). Lagarinhos (2011) afirma que o sistema de trituração utilizado aqui no Brasil é o de temperatura ambiente.

Neste trabalho será utilizado o resíduo de pneu inservível provindo de um processo de trituração e moagem a temperatura ambiente.

2.1.6 Possíveis Destinações do Pneu Inservível

A ANIP (2015) afirma que a Reciclanip, busca desenvolver novas alternativas de destinação de pneus inservíveis, dado que as possíveis maneiras existentes são reduzidas e ocorrem em poucos locais. A associação ainda afirma que a principal destinação do pneu inservível é como combustível alternativo na indústria cimenteira, como mostra no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Destinação de pneus inservíveis



Fonte: ANIP (2015).

Como constatado no Gráfico 2, a utilização de pneus inservíveis como combustível em fornos de cimenteiras é a destinação mais comum, em virtude de que

este resíduo tem um alto poder calorífico, superior ao do carvão, e as emissões de gases quando controladas não são piores do que outros combustíveis. (*World Business Council for Sustainable Development - WBCSD; International Energy Agency - IEA, 2009*).

Mattioli et al. (2009) dizem que a utilização de pneus inteiros na contenção de encostas apresenta bons resultados para evitar a erosão e carregamento do solo, dando destinação a uma grande quantidade deste material, porém deve-se ter o cuidado com a manutenção, caso contrário os pneus podem se transformar em habitat para vetores transmissores de doenças.

A aplicação de resíduo de pneu inservível na composição do asfalto traz efeitos benéficos a este componente, como o aumento da vida útil em até três vezes, comparado com o asfalto tradicional, redução dos custos de manutenção, melhoria das propriedades de drenagem e visibilidade e ainda reduz a emissão de ruídos. (ETRMA, 2015, 2017).

O CEMPRE (2017) aponta que o resíduo de pneu inservível cortado em pedaços de aproximadamente 5 cm pode ser utilizado na compostagem, para ajudar a aeração do composto orgânico, porém devem ser retidos para posterior comercialização do adubo.

A utilização de dormentes, podendo ser fabricados com 97% de borracha de pneu reciclado, para assentamento dos trilhos é uma alternativa interessante, uma vez que este elemento ajuda a reduzir os ruídos, tornando esta modalidade de transporte mais confortável, tanto para os usuários quanto para as pessoas que moram próximos aos trilhos. (ETRMA, 2017).

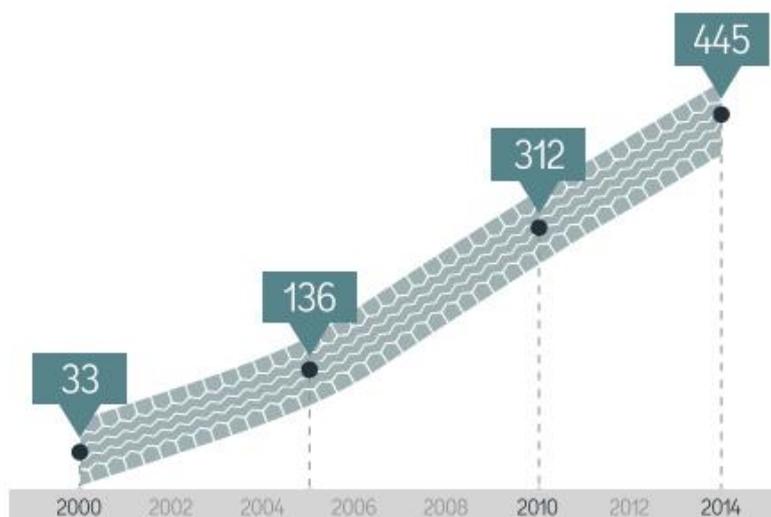
2.1.7 Geração de Resíduos Provenientes de Pneus Inservíveis

Segundo a ANIP (2017), no ano de 2016, foram vendidos 70,7 milhões de unidades de pneus, sendo 63,4% para o mercado de reposição e o restante destinados as montadoras de veículos e exportações.

Conforme dados da ABRELPE (2017), desde o início do programa de coleta de pneus em 1999, já foram recolhidos cerca de 4,2 milhões de pneus inservíveis em todo o país, este montante equivale a 835 milhões de pneus de carros de passeio. A associação ainda diz que em 2016 atingiu a marca de 1.025 pontos de coletas de pneus inservíveis distribuídos nos municípios brasileiros. Nos Gráfico 3 e Gráfico 4

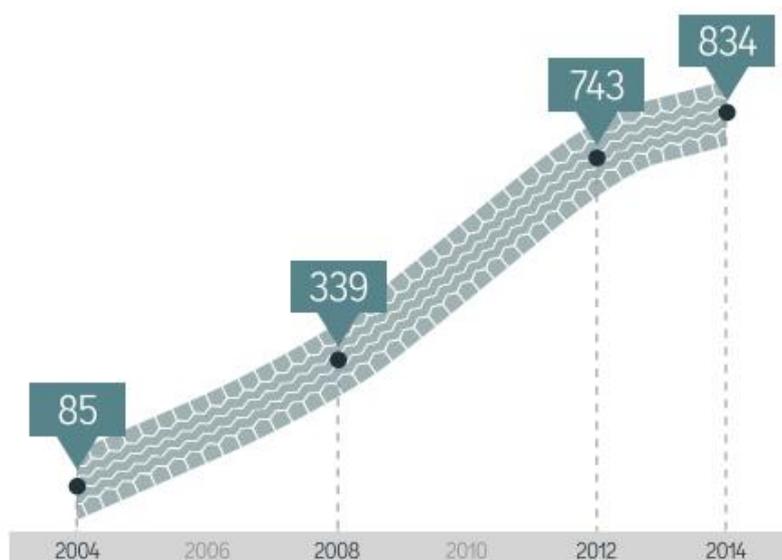
observam-se o crescimento do volume de pneus inservíveis coletados e o número de pontos de coleta ao longo do tempo, respectivamente.

Gráfico 3 – Volumes de pneus inservíveis coletado e destinado pela Reciclanip (em mil toneladas) ao longo do tempo



Fonte: ANIP (2015, p. 17).

Gráfico 4 – Evolução dos pontos de coleta de pneu inservíveis no Brasil



Fonte: ANIP (2015, p. 17).

2.2 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo devido a disponibilidade de matéria prima e a facilidade de preparação e moldagem em diferentes formas, tendo o cimento Portland como um dos principais ingredientes. (MUTTASHAR; LOKUGE; KARUNASENA, 2014).

De acordo com WBCSD e IEA (2009) cerca de 5% das emissões antropogênicas globais de CO₂ são provenientes do processo de produção do cimento. A construção civil é um dos setores da sociedade que tem um alto consumo dos recursos naturais, sendo estimado de 15% a 50% dos recursos do planeta. (FERREIRA et al., 2017).

Limbachiya, Meddah e Ouchagour (2012) dizem que a difusão da sustentabilidade na construção civil está se tornando primordial. Ainda segundo os autores, a principal maneira de minimizar os impactos ambientais causados pela produção do concreto é a utilização de materiais alternativos reciclados em substituição parcial dos recursos naturais empregados na sua fabricação.

O agregado na estrutura do concreto desempenha um papel muito importante, dado que este pode alterar as propriedades de trabalhabilidade, resistência e durabilidade do concreto. (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012).

Pereira et al. (2015) afirmam que materiais como a sílica ativa, cinzas volantes e resíduos agroindustriais como a cinza de casca de arroz (CCA) são as adições mais estudadas devido as vantagens que estes normalmente conferem ao concreto, como os ganhos de resistência, maior durabilidade e a redução do consumo de cimento.

2.2.1 Concreto com Utilização de RCD

Sendo o setor da construção civil um dos principais responsáveis pelo consumo dos recursos naturais, acrescido ao fato deste ramo gerar expressivas quantidades de resíduos sólidos - dentre eles os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) - reciclar os RCD fazendo uso destes na composição do concreto se torna uma possibilidade vantajosa. Diante desta, ao mesmo tempo em que é reduzido o volume de disposição de resíduos, faz-se também a preservação da matéria prima. (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012).

Pelissari (2016) verificou em sua pesquisa que a reposição do agregado graúdo por Agregado Reciclado de Concreto (ARC) apresenta desempenho inferior ao concreto convencional, tendo uma menor trabalhabilidade, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. No entanto, Malešev, Radonjanin e Marinković (2010), tomando o cuidado de usar ARC provenientes de concreto com resistências mais elevadas, concluíram em seu estudo que as reduções das propriedades mecânicas foram quase insignificantes.

O WBCSD (2009) aponta que a utilização de RCD para fabricação de concreto tem as suas dificuldades, como a não regularidade de suprimento, bem como a não regularidade de suas propriedades, que pode acarretar numa variabilidade do seu desempenho.

2.2.2 Concreto com Utilização de Resíduos de Outros Setores

Pereira et al. (2015), fazendo uso de CCA com granulometrias de 12 µm, nas proporções em massa de 5% e 10% em substituição ao cimento Portland, conseguiram aumentar a resistência à compressão do concreto e da argamassa em 24% e 28%, respectivamente. Ainda segundo os autores, a CCA desempenha um ótimo papel como material pozolânico.

Khan et al. (2012) desenvolveram concretos com CCA com a mesma resistência do concreto convencional, repondo 25% em massa do cimento Portland, mostrando ser uma alternativa econômica e sustentável ao reduzir o consumo de cimento e dar uma destinação correta ao resíduo de CCA.

Concretos produzidos com 20% de cinza de cana-de-açúcar em substituição ao agregado miúdo mostraram que tal substituição é viável, uma vez que as suas propriedades foram constatadas ser similares as do concreto convencional, exceto no comportamento de resistência à penetração de cloretos e a abrasão, que apresentam melhores resultados, e a absorção por capilaridade e trabalhabilidade, que demonstraram resultados inferiores ao concreto referência. (FERNANDES et al., 2015).

No estudo da adição de cinza volante, Valderrama, Torres Agredo e Mejía de Gutiérrez (2011) encontraram melhorias nas propriedades do concreto, tendo, com 10% de reposição do cimento em massa, melhor comportamento mecânico e com 30% de substituição melhor comportamento relativo a durabilidade. Tutikian e Dal Molin (2011) também encontraram resultados benéficos da adição de cinza volante

em concreto autoadensável, tanto no comportamento mecânico quanto na resistência à penetração de cloretos.

As adições de metacaulim e sílica ativa podem aumentar significativamente a Vida Útil de Serviço (VUS) das estruturas de concreto armado, principalmente das expostas à ambientes marinhos, onde há ataque de cloretos, estas adições podem aumentar a VUS em 240% e 440% respectivamente para cada adição. (MEDEIROS et al., 2013).

Alguns destes materiais citados são de difícil acesso, ou ainda, possuem disponibilidade sazonal, podendo prejudicar a continuidade de produção de um material.

2.3 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO COM INSERÇÃO DE BORRACHA DE PNEU INSERVÍVEL

Fazzan, Pereira, Akasaki (2016) e Granzotto (2010) destacam que, nos últimos anos, vem sendo realizadas pesquisas para avaliar a viabilidade da utilização de resíduos de pneus inservíveis na composição do concreto, com o propósito de mitigar a disposição inadequada desses materiais visto que os mesmos são potencialmente danosos a saúde pública e ao meio ambiente.

O resíduo reciclado oriundo de pneu inservível, por apresentar características como leveza, elasticidade, capacidade de absorção de energia e isolamento termo acústico, se torna um material promissor para a indústria da construção civil, pois o seu emprego pode ser muito benéfico para determinados usos. (MARANO et al., 2013). Nesse sentido, Fazzan, Pereira e Akasaki (2016) salientam que estudos de resíduos de pneus inservíveis na composição do concreto devem ser realizados com o intuito de adquirirmos um melhor entendimento do comportamento destes materiais trabalhando conjuntamente.

Silva Júnior (2014) afirma que a adição de resíduo de borracha de pneu no concreto convencional pode ser realizada em substituição parcial ou total, tanto do agregado graúdo como do agregado miúdo, ou na forma de adição ao compósito cimentício. O autor acrescenta ainda, que o resíduo pode provir do processo de recauchutagem dos pneus inservíveis, apresentando uma forma mais fibrosa por se tratar de um procedimento de raspagem, bem como da trituração dos mesmos, encontrando-se estes em grânulos com dimensões mais proporcionais entre si.

O resíduo originado da atividade de recauchutagem é menos passível de possuir uma estrutura com impurezas, pois a raspagem é feita apenas da banda de rolamento, ao contrário do que ocorre com o resíduo produzido na moagem que utiliza o pneu como um todo. (SILVA JÚNIOR, 2014).

Albuquerque (2009) diz que o aproveitamento deste material traz resultados positivos socioeconomicamente para a sociedade em virtude da reciclagem de um material problemático, tanto para o meio ambiente quanto para a saúde pública, e a geração de empregos para coleta e beneficiamento do resíduo. A autora afirma ainda que para cada 100.000m³ de concreto é factível a redução de aproximadamente 300.000 pneus inservíveis dispostos erroneamente no meio ambiente e ainda a economia de 7.000 toneladas de areia, sendo este número possível aumentar em 100% quando utilizado para fins não estruturais.

Albuquerque (2009) constatou que a taxa de substituição de 10% do agregado graúdo por borracha de pneu é um valor pertinente, a ponto de não prejudicar as propriedades de durabilidade do compósito, bem como evitar grandes reduções das propriedades mecânicas. A autora acrescenta ainda, que para esta proporção de substituição podem ser utilizados tanto o resíduo granular quanto em forma de fibras, desde que as dimensões máximas características permaneçam em torno de 1,5mm e 4,8mm, respectivamente.

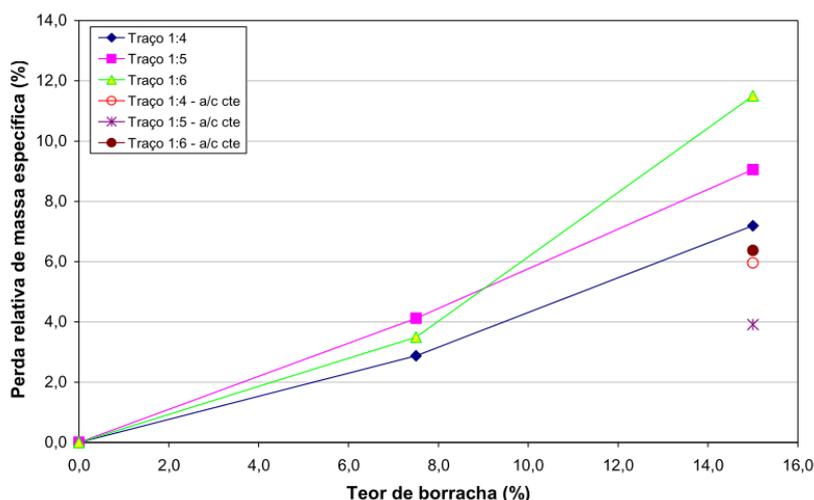
Quando avaliado a eficácia do tratamento superficial com polímero de base acrílica ou hidróxido de sódio (NaOH), aplicados às partículas de borracha, a fim de melhorar a aderência borracha/matriz cimentícia e, conseqüentemente, minimizar a redução da resistência mecânica decorrente da presença do agregado, estas análises não trouxeram mudanças significativas para o composto. (ALBUQUERQUE, 2009; SCHIMELFENIG et al., 2017).

2.3.1 Características no Estado Fresco

Segundo Albuquerque (2009), as principais propriedades do concreto no estado fresco são a trabalhabilidade, o teor de incorporação de ar e a massa específica, sendo necessária a verificação destas, posto que a inserção do resíduo de borracha reciclada pode alterar as características do concreto no que diz respeito a fluidez.

A apresentação de uma menor densidade do concreto com adição de borracha é uma das propriedades alteradas mais facilmente percebidas, uma vez que se faz a substituição do agregado, tanto miúdo quanto graúdo tradicionalmente utilizado, mais densos que os resíduos de borracha de pneu, como é observado no Gráfico 5. (AIELLO; LEUZZI, 2010; ALBUQUERQUE, 2009; MEHERIER, 2016; OSPINA, 2014; SILVA et al., 2017).

Gráfico 5 – Relação entre perda relativa de massa específica e teor de borracha

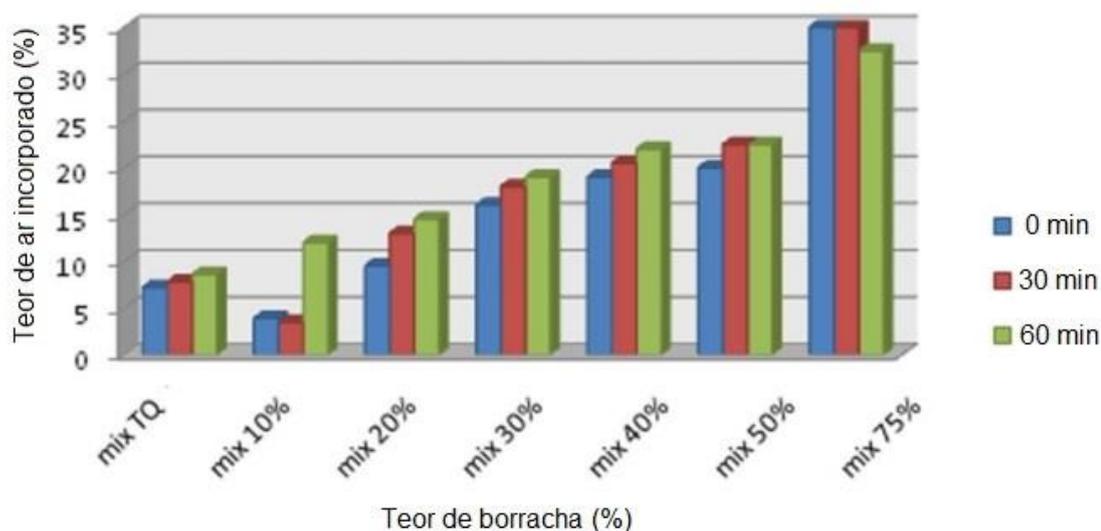


Fonte: Giacobbe (2008, p. 72).

Segundo o Gráfico 5, percebe-se a perda de massa específica do concreto no estado fresco registrado com o aumento do teor das partículas de borracha, independentemente da formulação do traço do concreto.

Albuquerque et al. (2004), Albuquerque (2009), Freitas et al. (2009), Marano et al. (2013) e Silva et al. (2017) constataram através de estudos, que o índice de incorporação de ar tende a crescer com a adição de partículas de borracha como mostra o Gráfico 6, sendo diretamente proporcional a sua incorporação e inversamente proporcional ao tamanho das partículas. Assim, misturas com maior percentual de utilização de borracha apresentam os maiores valores de teor de ar incorporado.

Gráfico 6 – Variação do teor de ar incorporado em função da adição de borracha



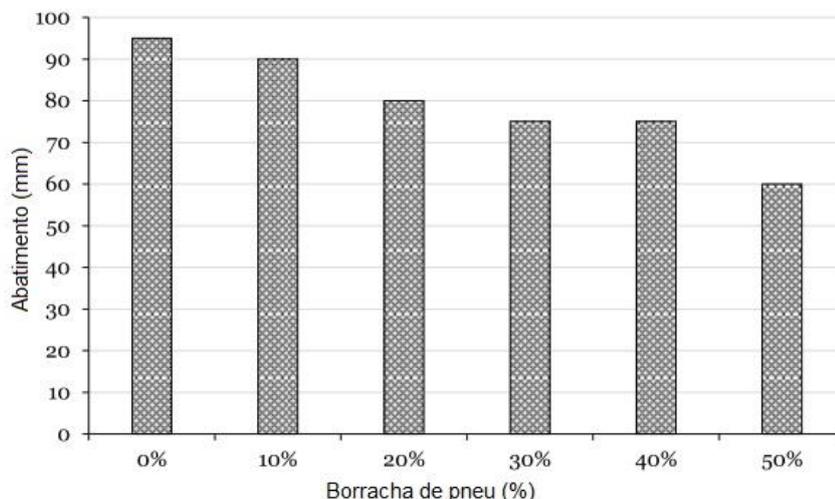
Fonte: Adaptado de Marano et al. (2013, p. 5, tradução nossa).

No Gráfico 6, identifica-se o comportamento previamente relatado, que com exceção da mistura com 10% de substituição, que demonstrou uma pequena redução, se distingue um crescimento constante do teor de ar incorporado simultaneamente com a adição de borracha. Entre os percentuais avaliados pelos autores, verificou-se linearidade entre o percentual de substituição e o teor de ar incorporado, podendo ser esta uma das razões pelo qual o concreto apresenta redução da resistência à compressão e da massa específica. (ALBUQUERQUE, 2009; SCHIMELFENIG et al., 2017).

Meherier (2016) afirma que o fato do teor de ar incorporado aumentar à medida que se adiciona resíduo de borracha, também conduz ao acréscimo na absorção de água. Entretanto, Fazzan, Pereira e Akasaki (2016) dizem que a absorção de água tem uma redução consideravelmente grande com a adição de borracha. As variações obtidas podem ser oriundas do empacotamento de partículas de dimensões variadas.

Uma série de estudos avaliaram a trabalhabilidade do concreto com adição de borracha, através do método de abatimento de tronco cone (*slump test*) e em geral apontaram para uma redução da fluidez do concreto a medida que se aumenta o teor da borracha, como pode ser averiguado no Gráfico 7. (BIGNOZZI; SANDROLINI, 2006; CAVICHILO; HECKLER; CAMPOS, 2017; GRANZOTTO; SOUZA, 2013; NAJIM; HALL, 2010; NOOR, 2014; PEREIRA, 2016).

Gráfico 7 – Valores do teste de abatimento de amostras de concreto fresco



Fonte: Adaptado de Meherier (2016, p. 62, tradução nossa).

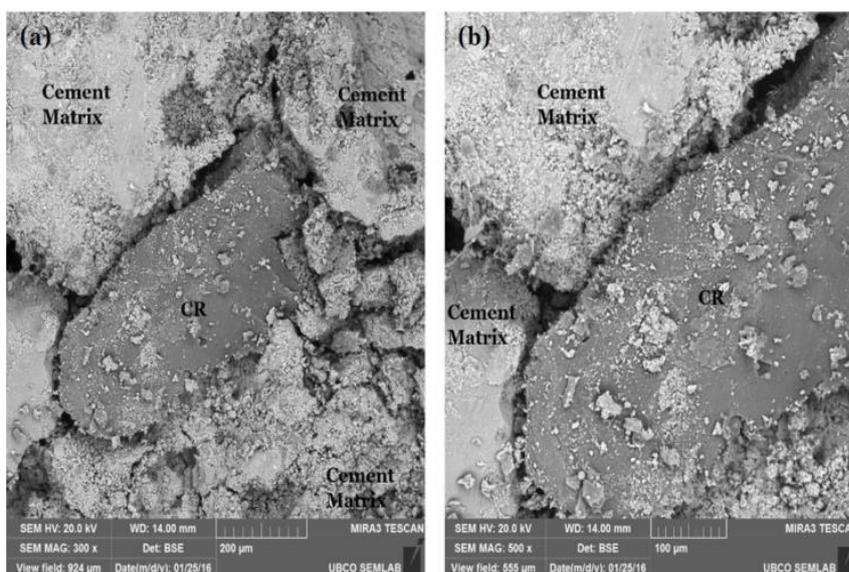
Conforme verificado pelo Gráfico 7, todas as composições avaliadas teriam classe de abatimento de S50, conforme a norma NBR 7212. (ABNT, 2012). O decréscimo do abatimento proporcional ao acréscimo de partículas de borracha pode ser atribuído a menor densidade da mistura, bem como à superfície áspera das partículas de borracha do pneu, o que pode resultar em aumento do atrito entre os ingredientes de concreto no estado fresco. (BATAYNEH; MARIE; ASI, 2008; REDA TAHA et al., 2008). Este comportamento deve ser levado em conta, visando adotar medidas para sanar tal deficiência.

2.3.2 Características no Estado Endurecido

Muitos estudos indicaram que a resistência à compressão, resistência à tração e o módulo de elasticidade decrescem conforme é adicionada borracha em substituição do agregado no concreto. Dentre as propriedades mais afetadas, destaca-se a resistência à compressão, dada a maior presença de vazios na composição dos concretos. (ALBUQUERQUE, 2009; CAVICHIOLO; HECKLER; CAMPOS, 2017; GESOĞLU; GÜNEYISI, 2007; LI, YUE; LI, YAQIANG, 2017; MEHERIER, 2016; SILVEIRA et al., 2016; REDA TAHA et al., 2008). Aiello e Leuzzi (2010) acrescentam que a reposição do agregado graúdo ao invés do miúdo causa maiores efeitos de redução da resistência tanto à compressão quanto à flexão.

Najim e Hall (2010) afirmam que este comportamento é causado devido a significativa disparidade entre o módulo de elasticidade do agregado de borracha e a pasta de cimento endurecida, bem como o fraco desenvolvimento da zona de transição interfacial. Segundo os autores, estes dois mecanismos são interdependentes, uma vez que a ligação na zona de transição leva ao surgimento e propagação de microfissuras em volta do perímetro da partícula de borracha, e ainda, sob carregamento, as taxas de tensões diferenciais entre a borracha e a pasta de cimento endurecida, intensificam este problema. Meherier (2016) acrescenta ainda que este enfraquecimento da ligação matriz/borracha pode ser consequência da presença de enxofre (S) e zinco (Zn) na superfície das partículas de borracha. Na Figura 4 é apresentada uma imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) na qual é possível visualizar esta ligação.

Figura 4 – Microestrutura do concreto com borracha; (a) matriz de cimento com partículas de borracha (300x) e (b) interface borracha/concreto (500x)



Fonte: Meherier (2016, p.66).

A Figura 4 evidencia a fraca ligação matriz/borracha, pois a borracha não reagiu uniformemente com a matriz cimentícia. (MEHERIER, 2016). Pode-se perceber ainda como na interface da partícula de borracha (CR) a zona de transição é frágil, ocasionando a redução de certas propriedades como a resistência à compressão, podendo apontar para um acúmulo de vazios.

Gesoğlu e Güneyisi (2007) analisaram a adição de sílica ativa no concreto com borracha e constataram um aumento significativo da resistência à compressão,

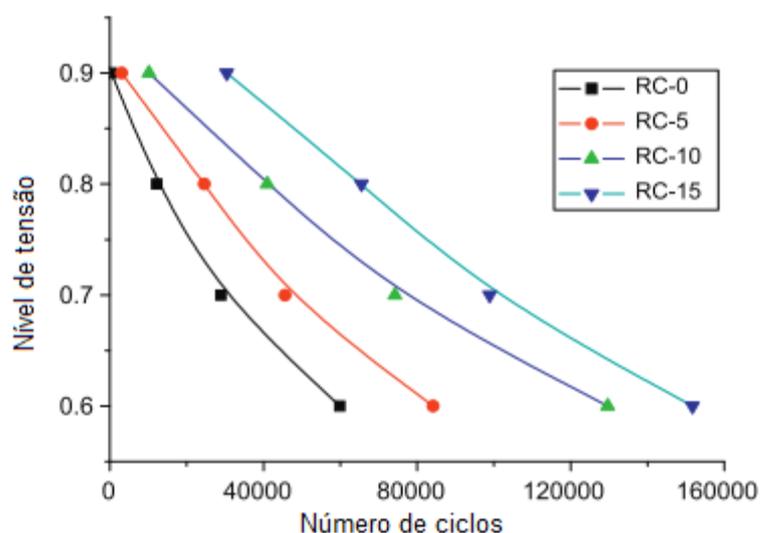
mostrando-se uma alternativa conveniente para melhorar o desempenho deste compósito cimentício. Os autores justificam este comportamento afirmando haver uma melhora na aderência entre a pasta cimentícia e as partículas de borracha que é provida pela sílica ativa.

Silveira et al. (2016) avaliaram em seu estudo o quanto de cimento deveriam adicionar para que o concreto com 10% de substituição da areia por borracha de pneu atingisse a mesma resistência do concreto convencional, obtendo o valor de 30% a mais que a quantidade normal.

Alguns autores também concluíram que a adição de borracha ao concreto aumenta a capacidade de absorção de energia, tornando-o assim mais resistente à impactos (LIU et al., 2015; SILVEIRA et al., 2016; ZHANG et al., 2014), bem como mais eficiente para minimizar o surgimento de fissuras de origem térmica, sendo muito benéfico para o concreto massa, uma vez que os custos associados com a refrigeração deste são bem significantes. (ALBUQUERQUE, 2009). Li Yue e Li Yaqiang (2017) explicam que a borracha no concreto, quando submetido a tensão de compressão, atua dissipando parcialmente a energia através da sua elasticidade melhorando a capacidade de deformação da matriz.

No que diz respeito a resistência à fadiga, Silveira et al. (2016) utilizando o critério das relações de tensões, concluíram que para uma menor relação de tensão, o concreto sem adição de borracha apresentava um melhor desempenho, já para a relação de tensão em níveis maiores, o concreto com borracha teve melhor desempenho médio. Os autores salientam que isto pode ser explicado pela maior capacidade de deformação antes da ruptura que o concreto com borracha possui. Liu et al. (2013) também encontrou resultados satisfatórios em relação a resistência à fadiga, como ilustra o Gráfico 8 a seguir, em que se percebe que para maiores teores de borracha, mais perceptíveis são as melhoras nos desempenhos da resistência à fadiga.

Gráfico 8 – Resistência à fadiga



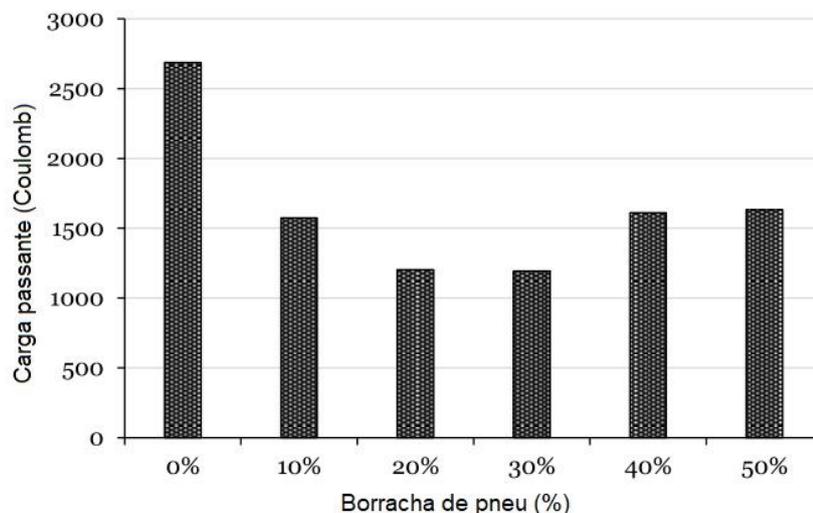
Fonte: Adaptado de Liu et al. (2013, p. 715, tradução nossa).

É notável o ganho de resistência à fadiga com a incorporação de partículas de pneu inservível como mostra o Gráfico 8, onde para o teor de 15%, a amostra resistiu aproximadamente duas vezes e meia mais ciclos do que o concreto referência.

2.3.3 Características de Durabilidade

Marano et al. (2013) e Meherier (2016) encontraram bons resultados de resistência à penetração de cloretos nas amostras de concreto com adição de borracha, sendo que os valores de 20% e 30% de reposição de borracha demonstraram melhores desempenhos, como se observa no Gráfico 9.

Gráfico 9 – Carga passante em função do teor de adição de borracha



Fonte: Adaptado de Meherier (2016, p. 91, tradução nossa).

Como ilustra o Gráfico 9, é claramente visível o benefício da adição de borracha ao concreto, até mesmo em pequenas proporções como de 10%.

A introdução de sílica ativa na quantidade de 10% em substituição ao cimento do concreto com borracha trouxe melhoras à resistência a penetração de cloretos, independentemente da quantidade de reposição do agregado por borracha de pneu. (GESOĞLU; GÜNEYISI, 2007).

Yung W., Yung L. e Hua (2013) analisaram a adição de pó de borracha de pneu em concretos autoadensáveis e concluíram que a substituição de 5% do agregado miúdo trouxe significantes benefícios a durabilidade, como por exemplo o aumento da resistência à corrosão por sulfatos. Os autores constataram ainda que o resíduo passante na peneira com abertura de 0,30mm teve o melhor desempenho geral comparado ao concreto com adição de resíduo passante na peneira com abertura de 0,60mm e na mistura de ambos.

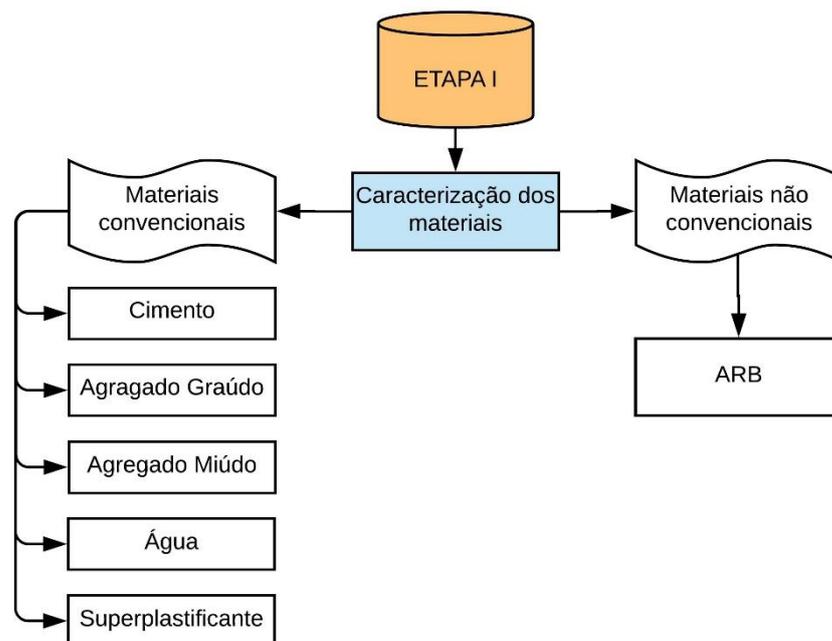
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados os materiais e métodos utilizados para que o objetivo deste estudo fosse atingido com êxito. Para tal, os materiais constituintes foram caracterizados e foram moldadas amostras de diferentes dosagens de concreto, variando a porção de substituição em volume do agregado miúdo e a granulometria do agregado reciclado de borracha (ARB) proveniente do processo de trituração e moagem de pneus inservíveis. Os materiais que constituíram o compósito cimentício são os que se encontram disponíveis na região do Vale dos Sinos/RS, sendo utilizada a infraestrutura laboratorial citada na sequência.

3.1 ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

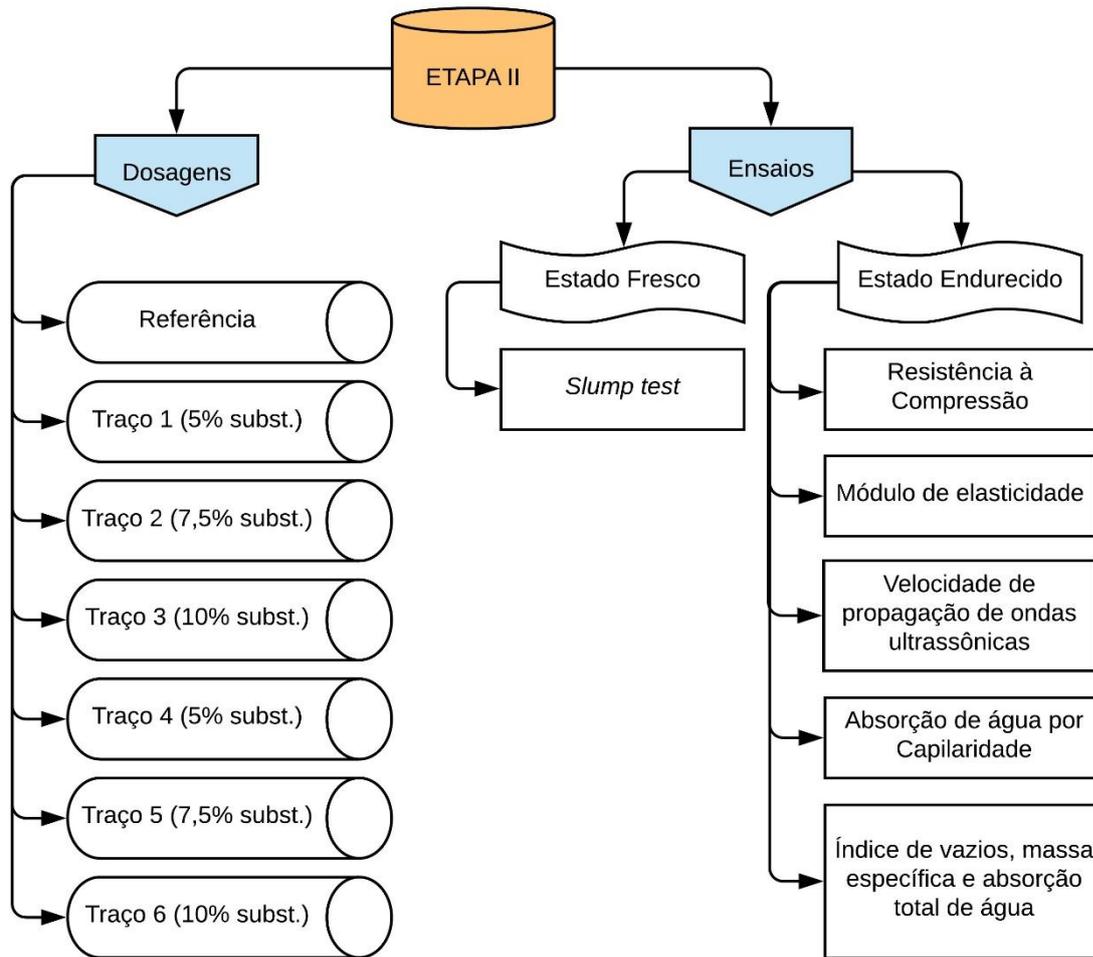
O programa experimental se dividiu em duas etapas, como ilustram as Figura 5 e a Figura 6 a seguir, sendo que a primeira consistiu na caracterização dos materiais e a segunda na moldagem das amostras conforme as dosagens do concreto que foram estabelecidas para posterior realização dos ensaios a fim de obter informações do comportamento físico e mecânico desta matriz cimentícia com inserção de ARB.

Figura 5 – Etapa I do programa experimental



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6 – Etapa II do programa experimental



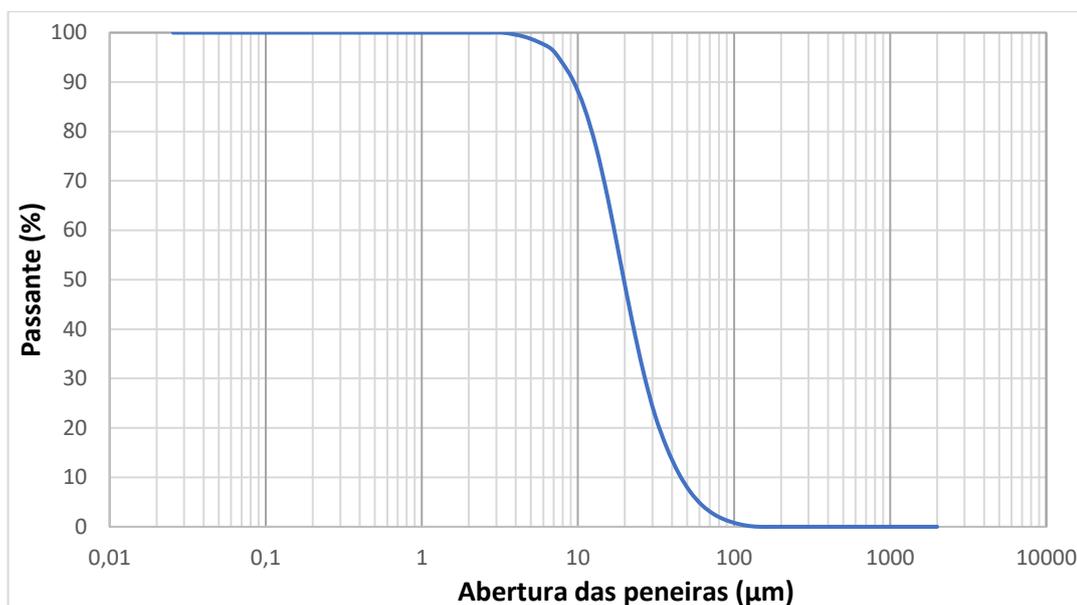
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1 Cimento

Optou-se pela utilização de cimento CP-IV 32 e o mesmo foi caracterizado em relação a sua composição granulométrica pelo método da granulometria a laser, utilizando como fluído o álcool isopropílico e o equipamento Microtrac, modelo S3500. O resultado obtido é apresentado no Gráfico 10.

Gráfico 10 – Granulometria do Cimento CP-IV 32



Fonte: Elaborado pelo autor.

O material apresentou os diâmetros característicos de D10 igual a 7,91μm, D50 igual a 16,55μm, D90 igual a 38,40μm e Dmédio igual a 19,05μm. Os dados de diâmetros característicos ajudam a descrever a distribuição granulométrica, sendo que D10, D50 e D90 são referentes a massa acumulada nas proporções de 10%, 50% e 90%, respectivamente, quando as partículas da amostra estão arranjadas de modo ascendente. (MAGWANDI, 2017).

3.2.2 Agregado Graúdo

O agregado graúdo que foi utilizado consiste em brita de origem basáltica, sendo que para sua caracterização foram realizados os ensaios de massa unitária, massa específica e composição granulométrica, em conformidade com os procedimentos das normas NBR NM45 (ABNT, 2006), NBR NM53 (ABNT, 2009c) e NBR NM248 (ABNT, 2003), respectivamente. A Tabela 2 apresenta os resultados de massa unitária, massas específicas aparente, do agregado seco e do agregado saturado com superfície seca. A distribuição granulométrica deste material é exposta na Tabela 3.

Tabela 2 – Massa unitária e massa específica do agregado graúdo: brita

Característica avaliada	Resultado obtido
Massa unitária	1,52 g/cm ³
Massa específica aparente	2,69 g/cm ³
Massa específica do agregado seco	2,82 g/cm ³
Massa específica do agregado com superfície seca	2,74 g/cm ³

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Granulometria do agregado graúdo

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	% retido em massa	% acumulado
25	0	0	0
19	830,0	16,6	16,6
12,5	3492,1	69,8	86,4
9,5	574,6	11,5	97,9
6,3	101,5	2	100
4,75	1,9	0	100
2,36	0	0	100
1,18	0	0	100
0,60	0	0	100
0,30	0	0	100
0,15	0	0	100
Fundo	0	0	100
TOTAL	4996,6	100	100
Diâmetro máximo (mm): 25		Módulo de finura: 7,15	

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.3 Agregado Miúdo

Para a determinação das propriedades do agregado miúdo, similarmente ao agregado graúdo, utilizou-se os procedimentos descritos nas normas NBR NM45 (ABNT, 2006), NBR NM52 (ABNT, 2009b) e NBR NM248 (ABNT, 2003), sendo o material utilizado a areia extraída de rio, de origem quartzosa. Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos. A distribuição granulométrica consta na Tabela 5.

Tabela 4 – Massa unitária e massa específica do agregado miúdo: areia

Característica avaliada	Resultado obtido
Massa unitária	1,49 g/cm ³
Massa específica aparente	2,61 g/cm ³
Massa específica do agregado seco	2,59 g/cm ³
Massa específica do agregado com superfície seca	2,60 g/cm ³

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5 – Granulometria do agregado miúdo

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	% retido em massa	% acumulado
6,3	0	0	0
4,75	0,4	0,1	0,1
2,36	1,7	0,3	0,4
1,18	2,7	0,5	0,9
0,60	38,6	7,7	8,7
0,30	215,4	43,0	51,7
0,15	208,2	41,6	93,3
Fundo	33,5	6,7	100
TOTAL	500,5	100	100
Diâmetro máximo (mm) 4,75		Módulo de finura: 1,55	

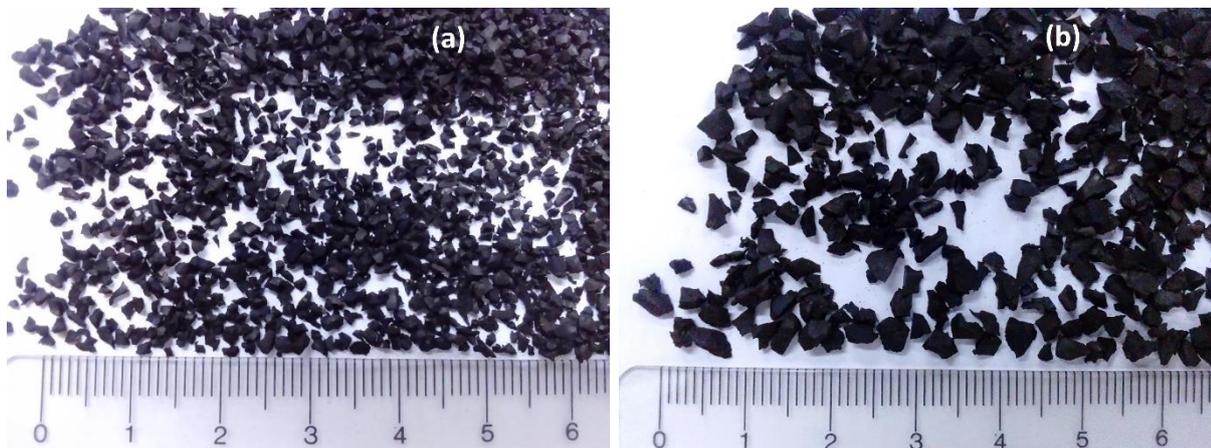
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.4 Agregado Reciclado de Borracha

O ARB foi fornecido pela empresa INDIBA - Industrial Batistella de Artefatos de Borracha Ltda., de Nova Santa Rita/RS, especializada na reciclagem de pneus. Para este estudo fez-se uso de duas faixas granulométricas do ARB, sendo elas de 0,7 a 2mm e 1 a 4mm como ilustra a Fotografia 1. A caracterização deste material foi semelhante ao do agregado miúdo, na qual para a determinação da composição granulométrica e massa unitária fez-se uso dos métodos dispostos nas normas NBR NM248 (ABNT, 2003) e NBR NM45 (ABNT, 2006), respectivamente. No entanto para determinação da massa específica optou-se pelo método dos frascos de Chapman,

descrito na norma NBR 9776 (ABNT, 1987), na qual foi realizada uma pequena adaptação no procedimento, fazendo uso de querosene ao invés de água, garantindo a submersão do material.

Fotografia 1 – Granulometrias do ARB (a) 0,7 a 2mm, (b) 1 a 4mm



Fonte: Registrada pelo autor.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados de massas unitária e massa específica do ARB. As distribuições granulométricas destes materiais estão expostas nas Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 6 – Massa unitária e massa específica do agregado miúdo: ARB

Característica avaliada	Resultado obtido
Massa unitária granulometria 0,7-2mm	0,54 g/cm ³
Massa unitária granulometria 1-4mm	0,56 g/cm ³
Massa específica	1,21 g/cm ³

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 7 – Granulometria do ARB granulometria 0,7-2mm

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	% retido em massa	% acumulado
6,3	0	0	0
4,75	0,3	0,2	0,2
2,36	120,3	80,2	80,4
1,18	28,2	18,8	99,2
0,60	1,3	0,8	100
0,30	0	0	100
0,15	0	0	100
Fundo	0	0	100
TOTAL	150,1	100	100
Diâmetro máximo (mm) 2,36		Módulo de finura: 3,80	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8 – Granulometria do ARB granulometria 1-4mm

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	% retido em massa	% acumulado
6,3	0	0	0
4,75	1,2	0,8	0,8
2,36	111,0	74,0	74,8
1,18	32,7	21,8	96,6
0,60	4,9	3,2	99,9
0,30	0,2	0,1	100
0,15	0	0	100
Fundo	0	0	100
TOTAL	150,0	100	100
Diâmetro máximo (mm) 4,75		Módulo de finura: 4,72	

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.5 Aditivo Superplastificante

Foi utilizado o aditivo superplastificante MC-POWERFLOW 1180, que é a base de polímeros policarboxilatos, produzido pela MC-Bauchemie, sendo fixado o valor adicionado à matriz do concreto de todos os traços para poder avaliar a influência da incorporação do resíduo de borracha na trabalhabilidade, através do teste de abatimento de troco de cone (*slump test*).

3.2.5 Água

Utilizou-se água potável proveniente da rede de tratamento público da cidade de São Leopoldo-RS.

3.3 MÉTODOS DE DOSAGEM

Denominou-se para esta pesquisa as nomenclaturas CB5A, CB7,5A e CB10A, que são referentes aos teores de substituição de 5%, 7,5% e 10%, respectivamente, com ARB de granulometria de 0,7 a 2mm, e CB5B, CB7,5B e CB10B para os teores de substituição de 5%, 7,5% e 10%, respectivamente, com ARB de granulometria de 1 a 4mm. Os dados das dosagens adotadas estão expostos na Tabela 9.

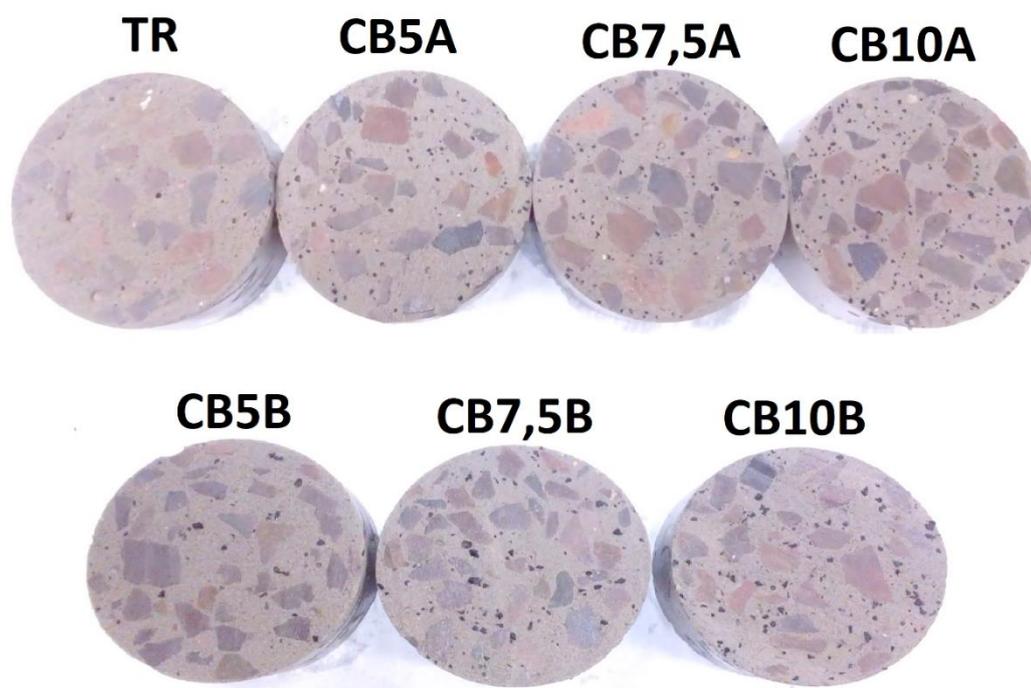
Tabela 9 – Dosagens unitárias (em massa) empregadas na produção dos concretos

Traço	Teor de substituição	Cimento	Areia	Brita	Tipo de ARB	ARB	Água	Aditivo
TR	0%	1,00	2,90	3,00	-	0,00000	0,5279	0,006
CB5A	5%	1,00	2,76	3,00	0,7 a 2mm	0,05247	0,5279	0,006
CB7,5A	7,5%	1,00	2,68	3,00	0,7 a 2mm	0,07870	0,5279	0,006
CB10A	10%	1,00	2,61	3,00	0,7 a 2mm	0,10493	0,5279	0,006
CB5B	5%	1,00	2,76	3,00	1 a 4mm	0,05441	0,5279	0,006
CB7,5B	7,5%	1,00	2,68	3,00	1 a 4mm	0,08161	0,5279	0,006
CB10B	10%	1,00	2,61	3,00	1 a 4mm	0,10882	0,5279	0,006

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Fotografia 2, apresentada a seguir, ilustra a aparência dos concretos moldados.

Fotografia 2 – Visual das amostras



Fonte: Registrada pelo autor.

É possível diferenciar na Fotografia 2, a quantidade de substituição que foi realizada em cada dosagem, bem como o tamanho dos grãos das partículas de borracha. Como pode-se perceber pela imagem das amostras seccionadas, houve uma distribuição aleatória dos agregados de borracha ao longo da amostra. Ainda, não há evidências visualmente perceptíveis de um maior ou menor número de vazios com a maior utilização dos agregados reciclados.

3.4 MÉTODOS DE ENSAIO

3.4.1 Estado Fresco

No estado fresco foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), sendo executado conforme os procedimentos descritos na NBR NM 67 (ABNT, 1998) e os resultados foram classificados de acordo com a NBR 7212. (ABNT, 2002).

3.4.2 Estado Endurecido

3.4.2.1 Resistência Mecânica à Compressão

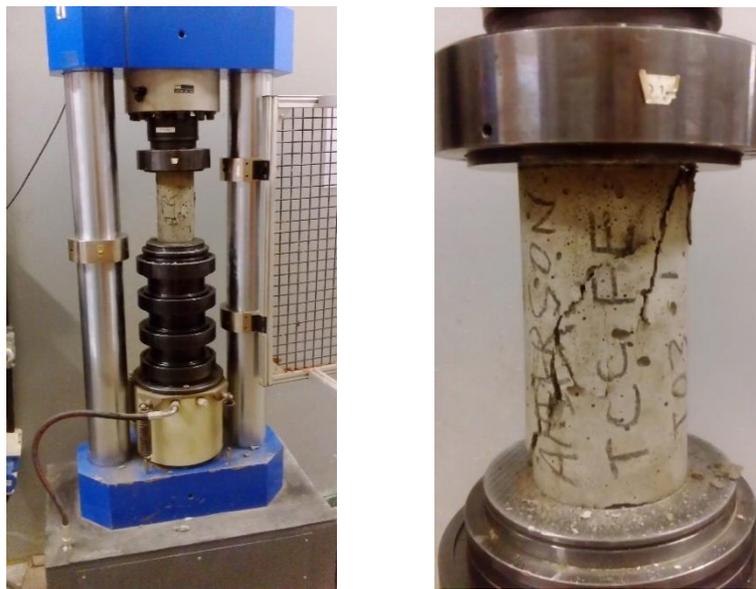
O ensaio de resistência à compressão foi realizado segundo a NBR 5739 (ABNT, 2007), nas idades de 7 e 28 dias, sendo ensaiados 3 corpos de prova por idade. As amostras foram confeccionadas de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015), nas dimensões de 100mm de diâmetro e 200mm de altura. Os corpos de prova foram retificados para melhor distribuição do carregamento de ensaio, como ilustra a Fotografia 3. Utilizou-se para esta análise prensa hidráulica Instron, modelo EMIC 23-300, com capacidade de 2000kN, conforme Fotografia 4. Ambos equipamentos pertencem ao laboratório LASE – Laboratório de segurança estrutural do itt Performance.

Fotografia 3 – Retificação da amostra



Fonte: Registrada pelo autor.

Fotografia 4 – Realização do ensaio de resistência à compressão



Fonte: Registrada pelo autor.

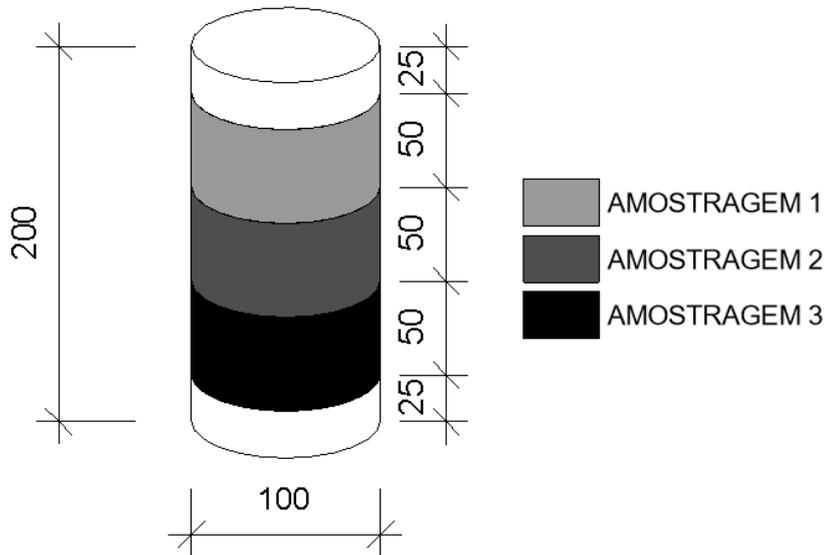
3.4.2.2 Módulo de Elasticidade

O ensaio do módulo de elasticidade do concreto foi realizado conforme as prescrições da NBR 8522 – *Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão* (ABNT, 2017), na idade de 28 dias. Para tanto foram utilizados corpos de prova com medidas de 100mm de diâmetro e 200mm de altura. Utilizou-se para este procedimento os resultados encontrados previamente no ensaio de resistência mecânica à compressão.

3.4.2.3 Absorção de Água por Capilaridade

Foi realizado o ensaio de absorção por capilaridade pelo método RILEM TC 116 PCD: *Permeability of concrete as a criterion of its durability*. (RILEM, 1999). Para tanto, foi feito o corte de 1 amostra cilíndrica de diâmetro equivalente de 100mm e 200mm de altura, retirando 3 amostras de 50mm \pm 1 conforme Figura 7. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) – UNISINOS, sob as condições de temperatura e umidade controlada, com 65 \pm 5% e 23 \pm 2°C, de umidade relativa do ar e temperatura ambiente, respectivamente, nas idades de 7 e 28 dias.

Figura 7 – Amostras para ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaborada pelo autor.

As amostras foram previamente secas em estufa até a constância de massa e medidas em relação à altura, diâmetro e massa inicial. Após, verificou-se a massa das amostras submetidas ao nível de água corrente nos períodos de 1min, 2min, 3min, 4min, 5min, 10min, 15min, 30min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 24h, 48h, 72h e 96h. A Fotografia 5 apresenta as amostras envoltas com balão e fita de alta adesão, a fim de garantir que as amostras não sofram influência da absorção de água do ambiente e apenas da sua área de base, avaliada no ensaio. O ensaio foi realizado na mesma sala climatizada de preparo das amostras.

Fotografia 5 – Amostras para o ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Registrada pelo autor.

3.4.2.4 Índice de Vazios, Massa Específica e Absorção Total de Água

A definição das características de índice de vazios, massa específica e absorção de água foi feito através do ensaio definido pela NBR 9778 – *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica* (ABNT, 2009a), na idade de 28 dias. Para a realização deste ensaio a norma recomenda um volume mínimo amostral de 1500cm³, para concretos cuja dimensão máxima do agregado seja de até 50mm, foi usado 3 corpos de prova de 100 (diâmetro) x 200 (altura) mm para cada um dos traços. Este procedimento foi realizado nas dependências do LMC – UNISINOS. Os corpos de prova foram armazenados no ambiente de cura, com 95 ± 5% e 23 ± 2°C, de umidade relativa do ar e temperatura ambiente, respectivamente, até a idade dos ensaios. O resfriamento das amostras ocorreu na sala de temperatura e umidade controlada, com 65 ± 5% e 23 ± 2°C, de umidade relativa do ar e temperatura ambiente, respectivamente. A Fotografia 6 demonstra as etapas do ensaio.

Fotografia 6 – Etapas do ensaio de massa específica, índice de vazios e absorção de água



Fonte: Registrado pelo autor.

3.4.2.5 Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica

Foi realizado o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica, respeitando os procedimentos da NBR 8802: *Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*. (ABNT, 2013). Esta análise ocorreu em amostras cilíndricas de base 100mm e altura de 200mm nas idades de 7 e 28 dias, na qual fez-se uso de três corpos de prova para cada idade avaliada, utilizando o valor médio para análise. Foi utilizado para esta análise o instrumento ultrassônico Pundit Lab fabricado pela Proceq.

As amostras foram previamente preparadas e após retificados os corpos de prova fez-se aplicação de uma camada de aproximadamente 5mm de vaselina sólida nas faces da amostra, garantindo um ótimo acoplamento entre os dispositivos de emissão e recepção de onda magnética e as amostras avaliadas. A Fotografia 7 apresenta os procedimentos de preparo e realização da medição.

Fotografia 7 – Preparo da amostra e verificação da propagação das ondas ultrassônicas



Fonte: Registrado pelo autor.

O ensaio foi realizado de modo transmissão direta, com os transdutores nas faces opostas do corpo de prova, para obter a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, sendo determinadas três leituras para cada amostra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados provindos do programa experimental previamente apresentado. No apêndice A se encontra uma tabela síntese de todos os resultados obtidos nesta pesquisa.

4.1 ESTADO FRESCO

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos no ensaio de abatimento do tronco de cone para os diferentes traços, bem como as condições climáticas no momento da mistura.

Tabela 10 – Abatimento do tronco de cone e características das moldagens

Traço	Abatimento (mm)	Tempo de mistura (min)	Temperatura ambiente (°C)	Umidade relativa do ar (%)
TR	170	11	22,6	80
CB5A	130	11	22,6	80
CB7,5A	165	11	22,6	80
CB10A	155	11	22,6	80
CB5B	150	11	21,3	74
CB7,5B	155	11	21,3	74
CB10B	150	11	21,3	74

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme verifica-se na Tabela 10, os valores obtidos de abatimento do tronco de cone dos traços TR e CB7,5A classificam-se, de acordo com a norma NBR 7212 (2012), como S160 enquanto os demais traços como S100. No Gráfico 11 tem-se uma melhor visualização do comportamento da consistência dos concretos moldados.

Gráfico 11 – Abatimento do tronco de cone



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado no Gráfico 11, não é possível averiguar um comportamento linear entre o abatimento do tronco de cone e o teor de incorporação do ARB, tão pouco a influência do tamanho das partículas na consistência do concreto. Este comportamento pode ser justificado pela pequena variabilidade do teor de incremento do ARB entre os diferentes traços estudados. Entretanto, é notável a perda da trabalhabilidade comparado ao concreto referência, chegando a um máximo de aproximadamente 23,5% para o traço CB5A.

Considerando amostras com mesmo teor e diferente granulometria, por exemplo, as duas amostras contendo 5% tem-se que o traço com ARB de granulometria maior apresentou uma perda da trabalhabilidade menor, chegando a 11,8%, enquanto o traço com ARB de granulometria menor demonstrou um valor de perda de abatimento próximo ao dobro. Já para as amostras contendo 7,5% e 10% observa-se que os traços CB7,5A e CB10A tiveram menores perdas de trabalhabilidade, sendo de 2,9% e 8,8%, respectivamente, e 8,8% e 11,8% para os traços CB7,5B e CB10B, respectivamente, o que mostra ser um indício que em maiores proporções e com ARB de maior granulometria tende a reduzir a trabalhabilidade do concreto com mais relevância.

Embora não tenha sido possível constatar uma proporcionalidade do decréscimo da trabalhabilidade à medida que o teor de incorporação do ARB foi

aumentado, ainda assim é notável que a introdução do ARB à matriz do concreto acarreta na redução de sua fluidez, concordando com outros estudos encontrados na literatura. (KALOUSH; WAY; ZHU, 2005; SANTOS et al., 2017; SILVA JÚNIOR, 2014; SU et al., 2015).

4.2 ESTADO ENDURECIDO

4.2.1 Resistência Mecânica à Compressão

O ensaio de resistência mecânica à compressão foi realizado nas idades de 7 e 28 dias, sempre ensaiando três amostras por composição. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 11, sendo destacado os valores de resistência média e resistência potencial.

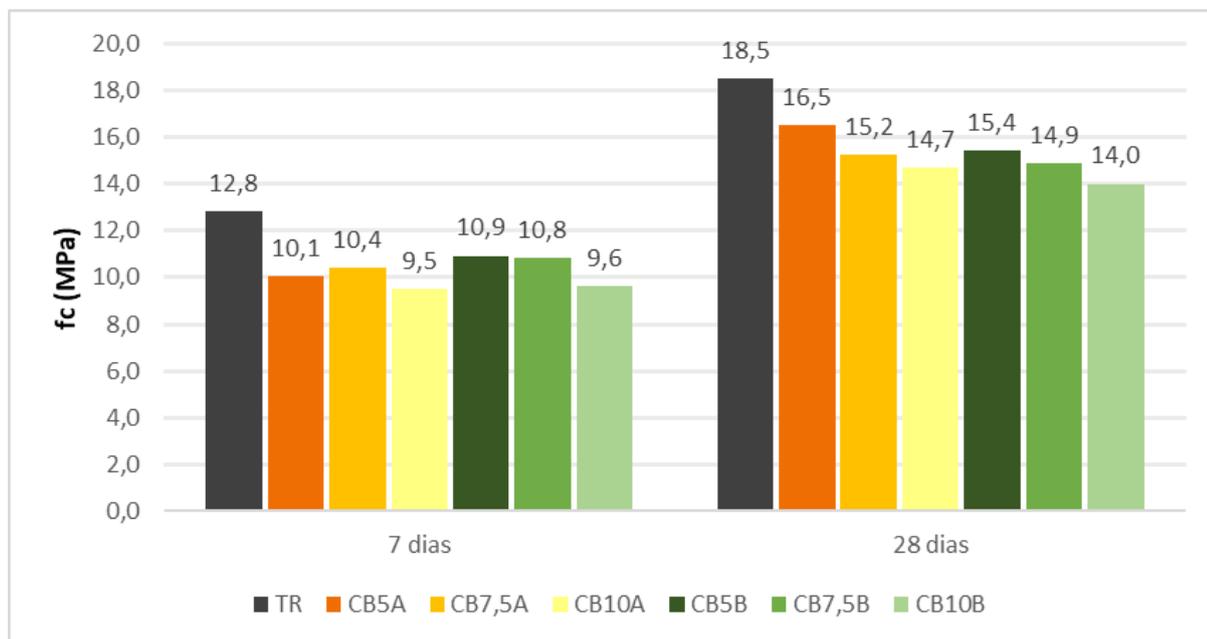
Tabela 11 – Valores obtidos de resistência à compressão

Idade	Variável	Traço						
		TR	CB5A	CB7,5A	CB10A	CB5B	CB7,5B	CB10B
7 dias	Resistência média (MPa)	12,8	10,1	10,4	9,5	10,9	10,8	9,6
	Resistência potencial (MPa)	13,0	10,2	10,7	9,8	11,2	10,9	9,7
	Desvio Padrão	0,15	0,15	0,40	0,26	0,38	0,12	0,06
28 dias	Resistência média (MPa)	18,5	16,5	15,2	14,7	15,4	14,9	14,0
	Resistência potencial (MPa)	19,0	17,2	15,8	15,2	15,7	15,8	15,7
	Desvio Padrão	0,44	1,05	0,68	0,69	0,25	1,25	2,22

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 11 percebe-se a pequena variabilidade entre os resultados das amostras de mesma composição para os ensaios realizados aos 7 dias, tendo um desvio padrão máximo de 0,40. Entretanto para a análise conduzida aos 28 dias obteve-se um desvio padrão de até 2,22. O Gráfico 12 apresenta os valores médios obtidos de resistência à compressão para ambas idades de análise.

Gráfico 12 – Valores médios obtidos de resistência à compressão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado no Gráfico 12, a incorporação do ARB no concreto fez com que a resistência à compressão diminuísse, como já era esperado conforme resultados similares em outras pesquisas (ALBUQUERQUE, 2009; FIORE et al., 2014; MEHERIER, 2016; MILLER; TEHRANI, 2017; RESENDE et al., 2017; THOMAS et al., 2014). Este efeito ocorreu tanto para os concretos com inserção do ARB de granulometria de 0,7 a 2mm quanto para os ARB de granulometria de 1 a 4mm, para ambas as idades.

Para as duas composições de diferentes granulometrias de ARB pode-se perceber uma proporcionalidade entre o teor de uso do ARB e a resistência à compressão, havendo apenas uma descontinuidade do traço CB5A na idade de 7 dias, que pode ser explicado por uma pequena irregularidade que possa ter ocorrido no momento de moldagem, visto que a variabilidade do teor de substituição é pequena e conseqüentemente a sensibilidade dos resultados é maior. Os resultados de 7 dias mostram quedas de 21,6%, 18,8% e 25,8% para os traços CB5A, CB7,5A e CB10A, respectivamente, e 14,9%, 15,6% e 25,0% para os traços CB5B, CB7,5B e CB10B, respectivamente. Quando analisada a influência da granulometria na perda de resistência à compressão nota-se um comportamento proporcional ao tamanho das partículas de borracha, apresentando uma variação média de 4,0% entre as granulometrias estudadas.

Entretanto, na idade de 28 dias, observou-se o comportamento contrário, dado que os traços contendo ARB de maior granulometria tiveram reduções de 16,5%, 19,6% e 24,3% para os traços CB5B, CB7,5B e CB10B, respectivamente, enquanto os traços contendo ARB de granulometria menor obtiveram reduções de 10,6%, 17,7% e 20,4% para os traços CB5A, CB7,5A e CB10A, respectivamente, demonstrando que o tamanho das partículas de borracha é inversamente proporcional a resistência à compressão, tendo uma diferença média de 4,5% entre as granulometrias estudadas.

Os resultados obtidos aos 28 dias concordam com os encontrados nos estudos de Albuquerque (2009) e Liu et al. (2012) que demonstram que a resistência mecânica à compressão é inversamente proporcional ao tamanho das partículas do ARB. Percebeu-se um maior decréscimo da resistência à compressão aos 28 dias nas amostras contendo ARB de maiores dimensões.

4.2.2 Módulo de Elasticidade

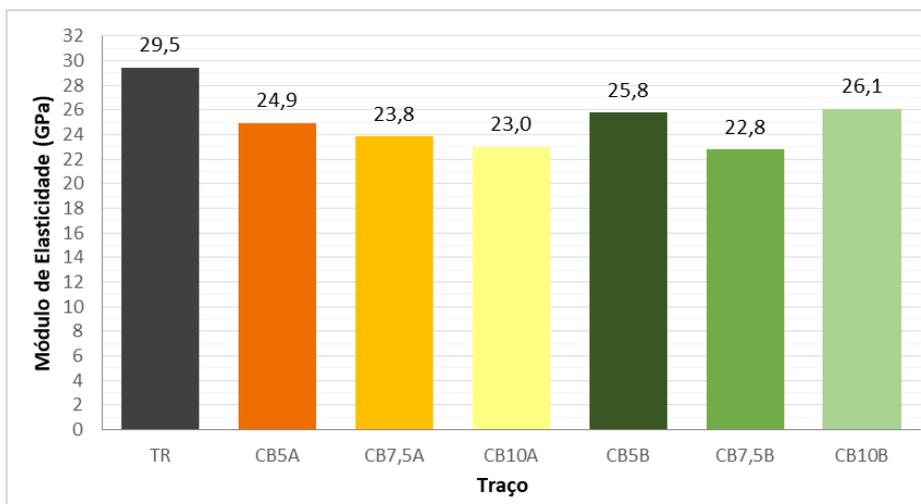
Na Tabela 12 e no Gráfico 13 estão apresentados os valores obtidos do módulo de elasticidade na idade de 28 dias, bem como o desvio padrão obtidos nas distintas dosagens.

Tabela 12 – Valores médios obtidos de módulo de elasticidade aos 28 dias

Traço	TR	CB5A	CB7,5A	CB10A	CB5B	CB7,5B	CB10B
Módulo de Elasticidade (GPa)	29,46	24,92	23,85	23,04	25,78	22,78	26,08
Desvio padrão	0,73	1,69	0,96	2,14	0,68	1,70	2,28

Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 13 – Valores médios obtidos de módulo de elasticidade aos 28 dias



Fonte: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 13 observa-se que para todos os traços que contem ARB o módulo de elasticidade foi menor quando comparado ao concreto referência, comportamento este demonstrado também em outros estudos (ALBUQUERQUE, 2009; ATAHAN; YÜCEL, 2012; MEHERIER, 2016; MILLER; TEHRANI, 2017; PINHEIRO et al., 2017; SCHIMELFENIG et al., 2017).

Os traços CB5A, CB7,5A e CB10A, traços contendo a menor granulometria do ARB, apresentaram decréscimos de 15,6%, 19,3% e 22,0%, respectivamente, evidenciando uma proporcionalidade entre o aumento do incremento de ARB e a redução do módulo de elasticidade. No entanto, quando avaliado os traços CB5B, CB7,5B e CB10B que tem em sua composição ARB com granulometria maior, teve-se uma variação não linear inesperada, com reduções do módulo de elasticidade de 12,5%, 22,7% e 11,5%, respectivamente.

4.2.3 Absorção de Água por Capilaridade

Na Tabela 13 estão apresentados dados resultantes de cálculos com base nas informações coletadas do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 7 e 28 dias, sendo estes: resistência capilar (R), taxa de absorção capilar (S) e a absorção efetiva (Pef). A absorção capilar se divide em duas fases: fase de absorção e a fase de saturação. Sendo então o valor da absorção efetiva referente a absorção total, na fase de absorção, por unidade de volume. Costa (2015) elucida que a taxa de

absorção de água é alusiva a capacidade com que o concreto absorve água em função do tempo, enquanto a resistência capilar faz jus a dimensão e posicionamento dos poros capilares, sendo assim, concretos com poros menores e mais alinhados tendem a ter uma resistência capilar menor, permitindo uma maior ascensão capilar.

Tabela 13 – Valores obtidos no ensaio de absorção por capilaridade

Traços	7 dias			28 dias		
	R(h/m ²)	S(mm.√h)	P _{ef} (g/cm ³)	R(h/m ²)	S(mm.√h)	P _{ef} (g/cm ³)
TR	9676	11,73	0,117	7152	7,29	0,064
CB5A	8033	8,93	0,083	6653	6,12	0,052
CB7,5A	6123	9,74	0,080	6977	5,91	0,051
CB10A	4900	9,46	0,070	5989	6,07	0,050
CB5B	6276	10,78	0,089	7506	6,10	0,055
CB7,5B	5680	10,60	0,083	6841	6,00	0,052
CB10B	7353	11,36	0,100	6489	5,87	0,048

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observando os resultados de resistência capilar, taxa de absorção capilar e absorção efetiva aos 7 dias expostos na Tabela 13, percebe-se que os maiores valores foram demonstrados pelo traço referência, em relação aos demais. Nota-se ainda que as composições que contém ARB de granulometria menor apresentam as menores taxas de absorção capilar, chegando a uma redução de 19,4% para o traço CB10A.

Porém, não é possível avaliar a influência do incremento de ARB na resistência capilar, tão pouco na taxa de absorção capilar nesta idade, uma vez que os dados se comportam de modo aleatório. Analisando a absorção efetiva nota-se um comportamento linear decrescente conforme o incremento do ARB, com exceção do traço CB10B, tendo os traços com ARB de granulometria menor os melhores resultados, apresentando decrementos de 29,1%, 31,9% e 40,7% para os traços CB5A, CB7,5A e CB10A, respectivamente, todos em relação aos valores obtidos pelo concreto referência.

Os resultados provenientes da idade de 28 dias demonstraram novamente que o traço referência tem os resultados mais altos, tanto de resistência capilar e taxa de absorção capilar, quanto de absorção efetiva, salvo o traço CB5B. É possível verificar uma certa proporcionalidade dos resultados à medida que é aumentado o teor do ARB, com exceção do traço CB7,5A, atingindo valores mínimos de taxa de absorção

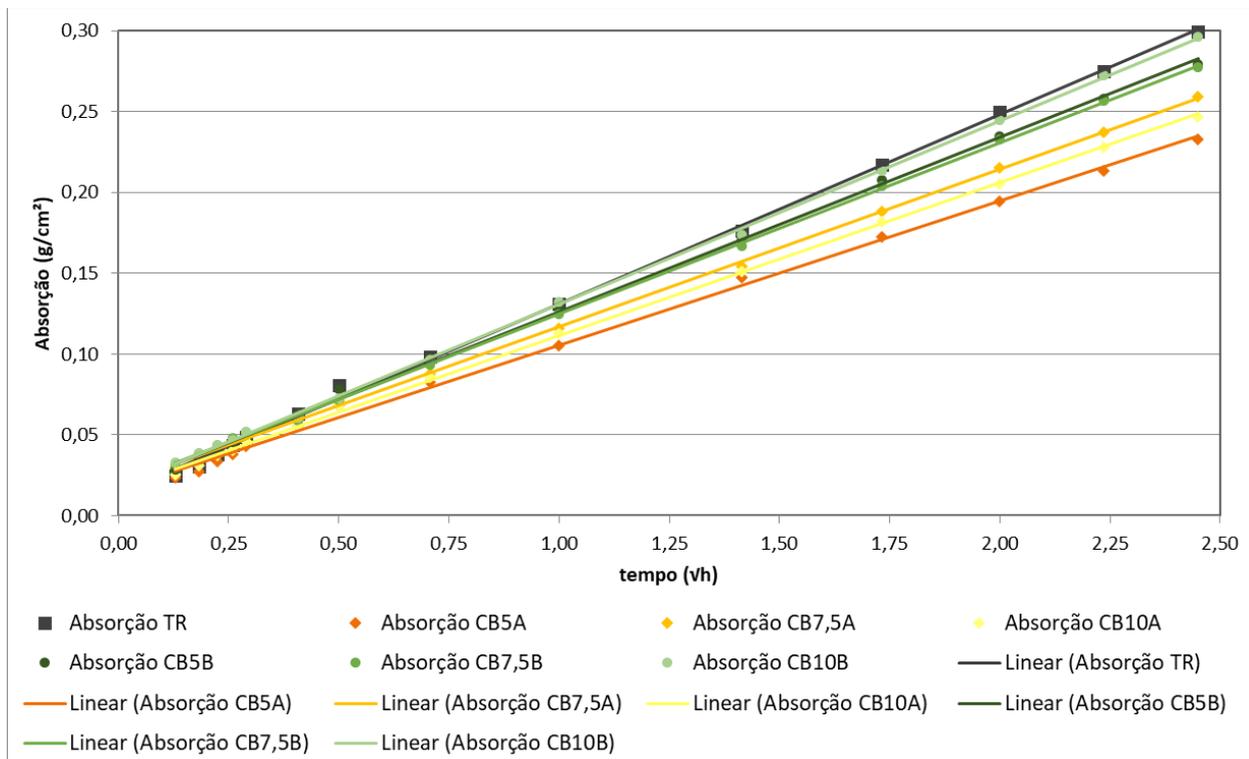
de $5,91\text{mm}\cdot\sqrt{h}$ e $5,87\text{mm}\cdot\sqrt{h}$, que corresponde a uma redução de 18,9% e 19,5% para os traços CB7,5A e CB10B, respectivamente.

Observa-se que os traços com ARB de granulometria maior apresentaram os melhores resultados de absorção efetiva, comportamento este contrário ao que foi desempenhado na idade de 7 dias, demonstrando reduções de 13,9%, 18,7% e 23,7%, para os traços CB5B, CB7,5B e CB10B, respectivamente.

Percebe-se ainda que todos os resultados apresentaram melhores desempenho aos 28 dias, uma vez que o concreto se encontra em um estado de hidratação mais avançado e conseqüentemente apresenta menor índice de porosidade, que por sua vez acarreta na redução da absorção de água. (HELENE, 1983).

A taxa de absorção e saturação aos 7 dias estão ilustradas nos Gráfico 14 e Gráfico 15.

Gráfico 14 – Taxa de absorção aos 7 dias

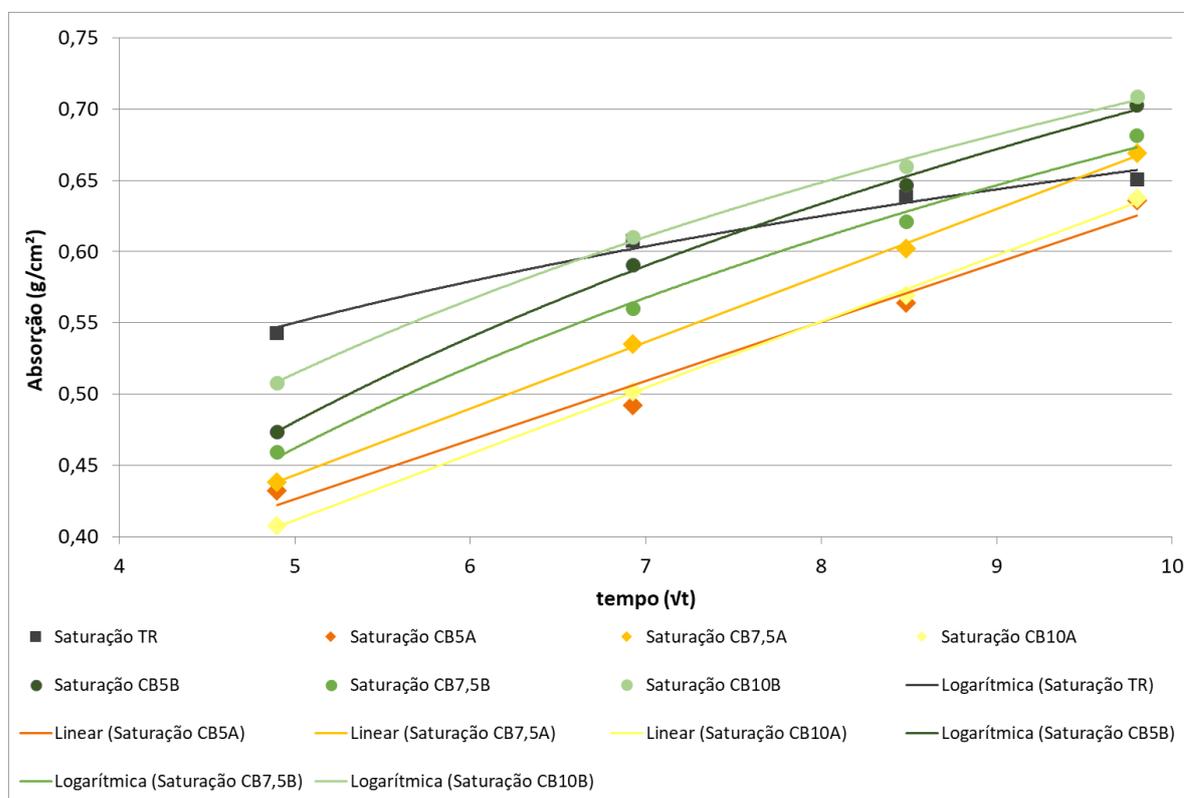


Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o Gráfico 14 percebe-se uma uniformidade dos valores obtidos para cada composição. Nota-se que a incorporação de ARB ao concreto resulta numa menor taxa de absorção capilar, sendo mais significativo quando utilizado

granulometrias menores de borracha. Entretanto, não é claramente visível o comportamento da absorção capilar frente ao aumento do teor de ARB.

Gráfico 15 – Taxa de saturação aos 7 dias

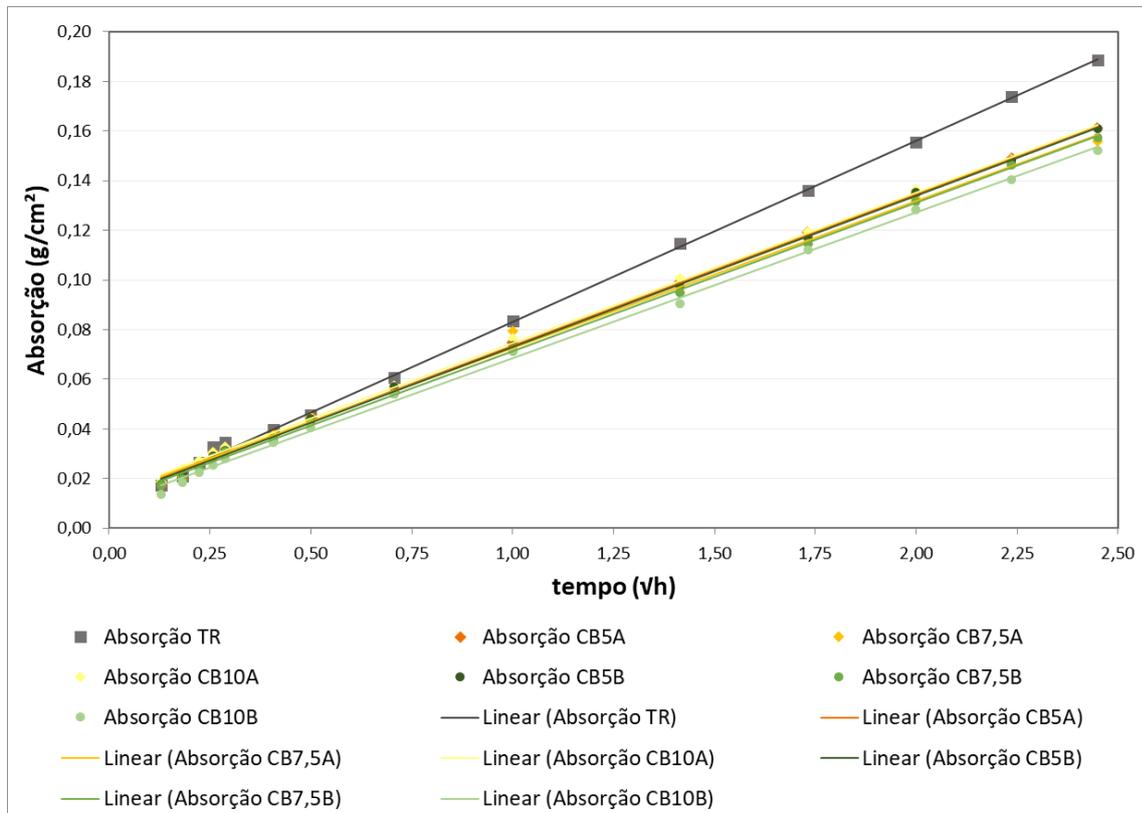


Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme verifica-se no Gráfico 15 a taxa de saturação dos traços com ARB tende a ser maior, sendo que as composições com ARB de maior granulometria obtiveram os maiores índices. Os coeficientes de determinação das curvas de absorção e saturação representadas nos Gráfico 14 e Gráfico 15 se encontram entre 0,980 e 1,000, indicando pertinência dos pontos obtidos nas verificações da absorção de água capilar à uma tendência de comportamento.

Nos Gráfico 16 e Gráfico 17 estão ilustradas as taxas de absorção e saturação aos 28 dias.

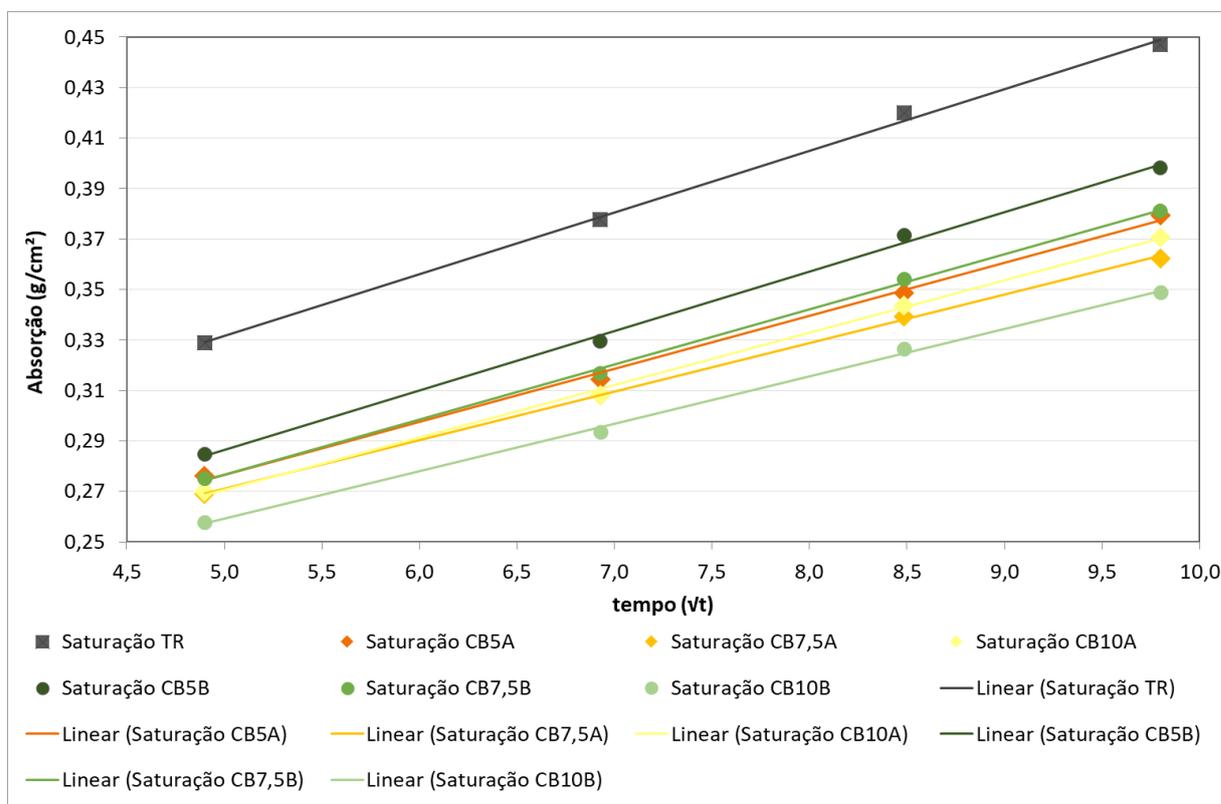
Gráfico 16 – Taxa de absorção aos 28 dias



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível averiguar no Gráfico 16 que para todos os traços com ARB tem-se inclinações das retas inferiores ao traço de referência. Denota-se que os traços com ARB com granulometria maior possuem as menores inclinações das retas, sendo que com o maior teor de ARB menor é a inclinação da reta. Com relação aos traços com ARB de granulometria menor, estes não apresentaram variações significantes entre os distintos teores de incorporação.

Gráfico 17 – Taxa de saturação aos 28 dias



Fonte: Elaborado pelo autor.

Semelhante aos resultados encontrados aos 7 dias, com exceção do traço CB10A, o Gráfico 17 indica uma maior inclinação da reta para os traços com ARB de maior dimensão. No entanto, de maneira contrária ao comportamento apresentado aos 7 dias, o concreto referência obteve a maior inclinação da reta de saturação. Os coeficientes de determinação das curvas de absorção e saturação representadas nos Gráfico 16 e Gráfico 17 situaram-se entre 0,998 e 1,000 para o ensaio realizado aos 28 dias, indicando uma pertinência das verificações à equação obtida.

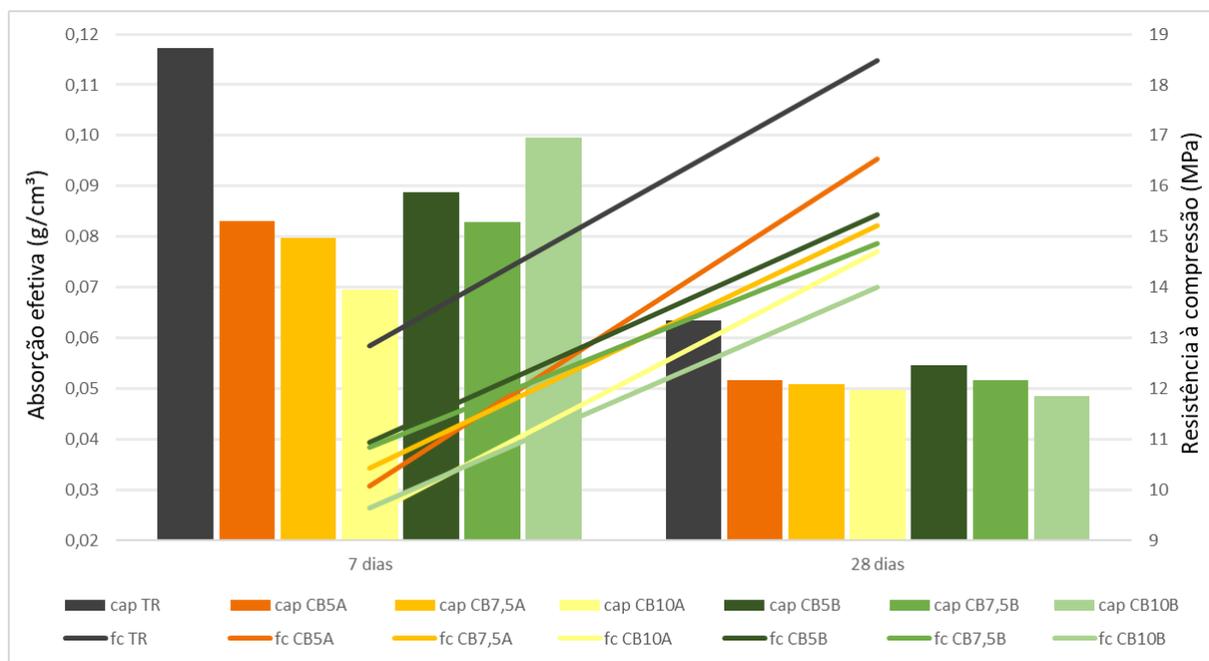
Leung et al. (2016) apontam este como um dos principais ensaios para avaliar a durabilidade do concreto, merecendo ser avaliado quando do estudo de novas composições. Shankar e Rao (2017), Kirchheim et al. (2004) e Barros (2008) acrescentam que a menor taxa de absorção de água indica que o material será mais durável, uma vez que o concreto será mais resistente à entrada de agentes agressivos.

Nesta pesquisa encontrou-se resultados que condizem com o estudo de Marano et al. (2014) que obtiveram um coeficiente de absorção capilar menor que o concreto convencional para misturas com 10% de resíduo de borracha de

granulometria de 2 a 4mm, no entanto, diferem dos que Thomas et al. (2014) apresentam, no qual os índices de absorção capilar aumentaram com o incremento de ARB, sendo utilizado a mistura de três granulometrias diferentes para compor o ARB, todos menores que 4mm.

No Gráfico 18 é ilustrado uma análise comparativa entre a resistência mecânica à compressão e a absorção de água efetiva.

Gráfico 18 – Absorção efetiva e resistência mecânica à compressão



Fonte: Elaborado pelo autor.

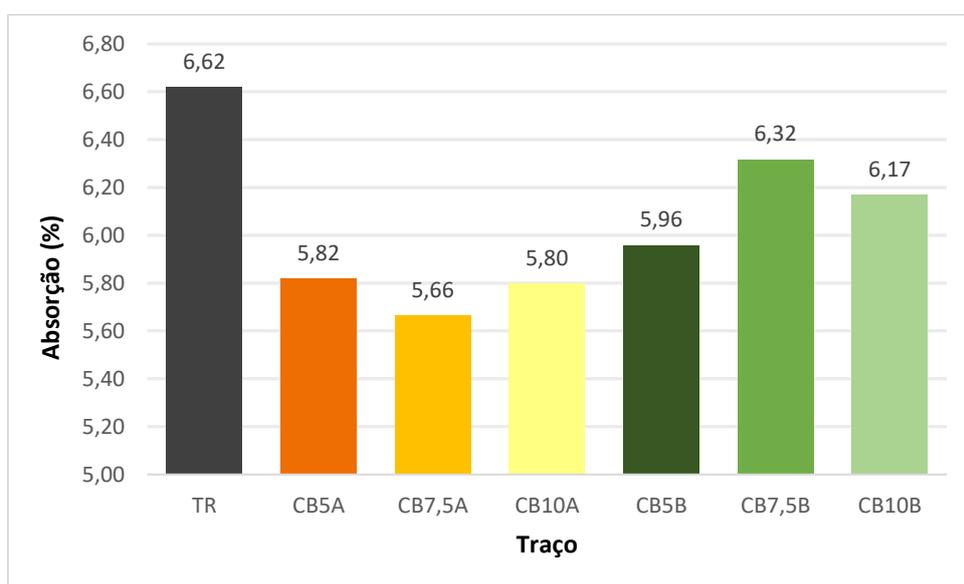
Conforme o Gráfico 18, a medida que a resistência mecânica à compressão aumentou a absorção efetiva também demonstrou valores menores. Zhang e Zong (2014) avaliaram a correlação entre estas duas propriedades do concreto e perceberam que para as maiores resistências à compressão se alcançavam valores menores de absorção capilar. No entanto, observando os resultados da idade de 28 dias, percebe-se que embora a resistência à compressão tenha decaído com o aumento do teor do ARB, ainda assim, a redução da absorção efetiva foi mais significativa nos traços contendo as maiores proporções do ARB, demonstrando a eficácia da incorporação deste resíduo perante a absorção capilar.

Percebe-se assim, que há danos mecânicos no comportamento do material, contudo, sem que tais danos signifiquem prejuízo ao seu comportamento durável.

4.2.4 Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica

Os valores de absorção de água, índice de vazios e massa específica normalmente estão interligados e seus resultados podem ser indicativos da durabilidade do concreto. (ALBUQUERQUE, 2009). Os valores médios obtidos de índice de vazios, absorção total de água e massa específica real das amostras avaliadas aos 28 dias estão apresentados nos gráficos a seguir. O Gráfico 19 é referente aos resultados de absorção de água.

Gráfico 19 – Resultados obtidos de absorção de água



Fonte: Elaborado pelo autor.

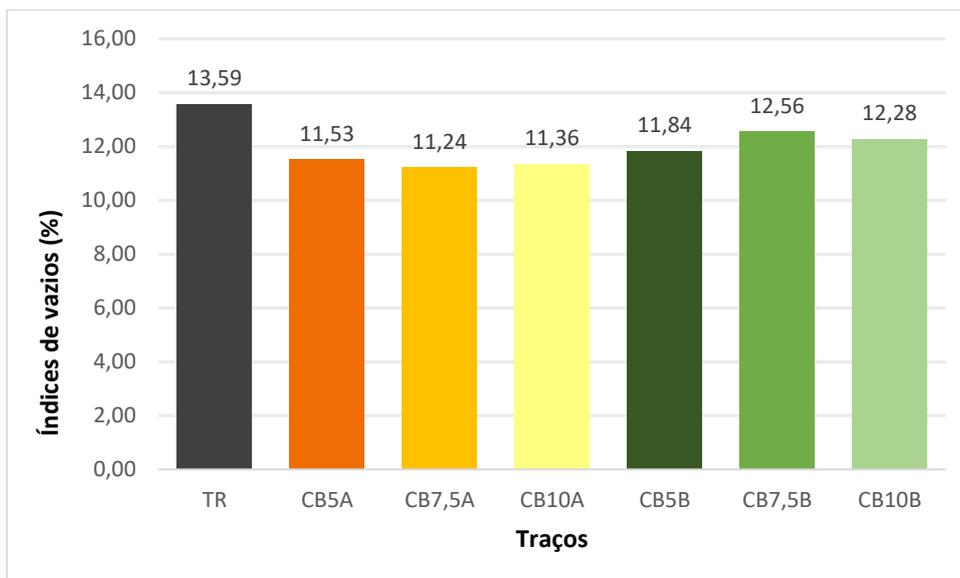
De acordo com o Gráfico 19, todos os traços com ARB obtiveram resultados de absorção de água inferior ao concreto referência, sendo que os traços com ARB de granulometria menor tiveram os menores valores de absorção, nas proporções de redução, referente ao traço referência, de 12,1%, 14,4% e 12,4% para os traços CB5A, CB7,5A e CB10A, respectivamente, e 10,0%, 4,6% e 6,8% para os traços CB5B, CB7,5B e CB10B, respectivamente, que contém ARB de granulometria maior. Verifica-se que tanto os resultados do concreto com ARB de granulometria maior quanto os com granulometria menor, não apresentaram uma linearidade em seu comportamento.

As pesquisas de Albuquerque (2009), Gupta, Chaudhary e Sharma (2014), Si, Guo e Dai (2017) e Thomas e Gupta (2015) também demonstraram uma redução da

absorção de água dos concretos com inserção de resíduos de borracha em pequenas proporções, o que denota a validade dos dados obtidos, embora um comportamento proporcional ao incremento de ARB, que era o esperado, não tenha ocorrido neste estudo em questão.

No Gráfico 20 estão expostos os resultados obtidos de índice de vazios.

Gráfico 20 – Resultados obtidos de índice de vazios



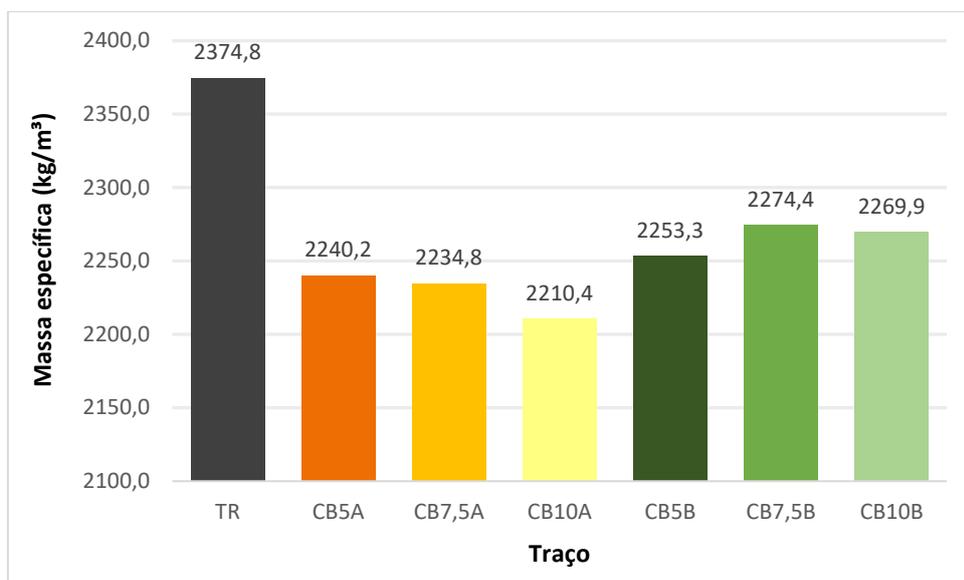
Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gráfico 20 apresenta os resultados obtidos, cujo o comportamento é semelhante aos de absorção de água, ou seja, foram obtidos valores menores para os traços com ARB, no qual os concretos com ARB de granulometria menor tiveram os índices de vazios mais baixos, com reduções de 15,1%, 17,3% e 16,4% para os traços CB5A, CB7,5A e CB10A, respectivamente, e 12,9%, 7,5% e 9,6% para os traços com ARB de granulometria maior, CB5B, CB7,5B e CB10B, respectivamente, sendo que para ambas granulometrias foi constatado um desempenho não linear conforme o incremento de partículas de borracha. O benefício na mitigação dos vazios pode ter sido proporcionado por um melhor empacotamento dos componentes do concreto, incluso os ARB.

Os dados obtidos condizem com os resultados encontrados na pesquisa de Albuquerque (2009), a qual afirma que para pequenas proporções de incorporação de resíduo de borracha tem-se um decréscimo do teor de ar incorporado.

Os dados obtidos de massa específica real estão ilustrados no Gráfico 21.

Gráfico 21 – Resultados obtidos de massa específica real



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se no Gráfico 21 que para todos os traços com ARB obtiveram-se valores inferiores ao concreto referência, sendo os traços com ARB de granulometria menor os que apresentaram as reduções mais proeminentes, nas proporções de 5,7%, 5,9% e 6,9% para os traços CB5A, CB7,5A e CB10A, respectivamente, demonstrando um comportamento linear decrescente a medida que foi aumentado o teor de ARB na matriz do concreto. Tal comportamento que não ocorreu com as dosagens de concreto com ARB de granulometria maior, que apresentaram decrementos de 5,1%, 4,2% e 4,4% para os traços CB5B, CB7,5B e CB10B, respectivamente.

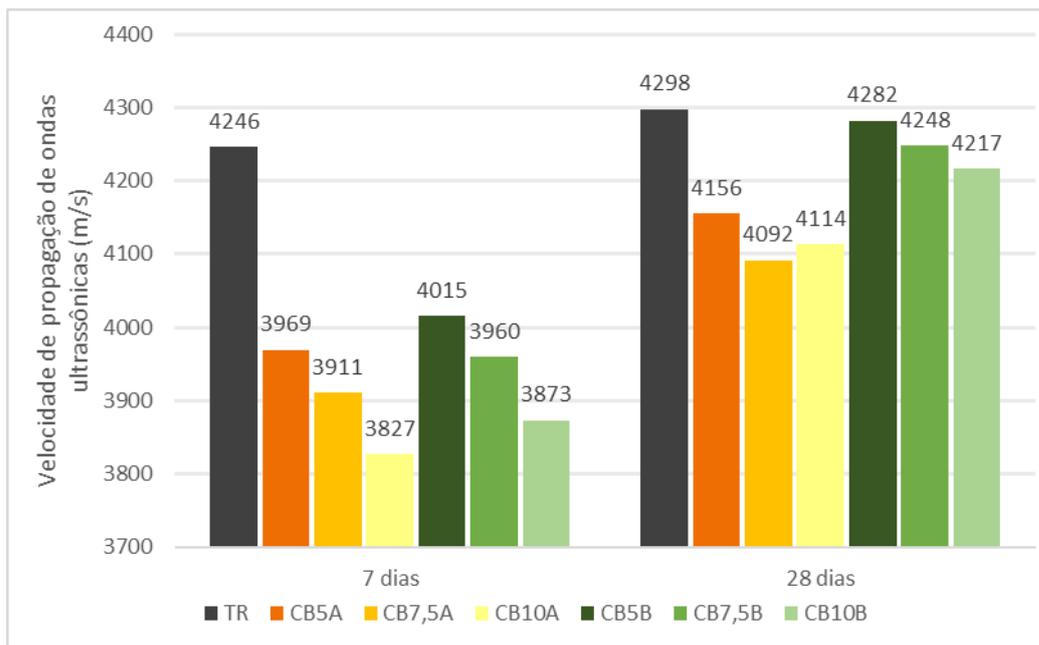
De forma geral, os valores obtidos de massa específica apresentaram um comportamento de acordo com outras pesquisas realizadas (BATISTA et al., 2017; GUPTA; CHAUDHARY; SHARMA, 2014; FREITAS et al., 2017), que demonstraram que a incorporação de resíduos de borracha ao concreto tende a torná-los menos denso.

Percebe-se assim, que mesmo com menor massa específica, e com a redução da resistência à compressão, que se tem um concreto com menor absorção de água e menor índice de vazios, em termos generalistas.

4.2.5 Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica

Conforme as recomendações do *American Concrete Institute (ACI)*, ACI 228 (1995), e os documentos da *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, ASTM C597 (2002), e *Indian Standard (IS)*, IS 13311 (1992), o método não destrutivo de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas serve para avaliar a qualidade do concreto, podendo este ser influenciado pela densidade do concreto, pelas características dos agregados, bem como pela presença de vazios ou fissuras na estrutura do concreto, ocasionando que a propagação da onda ultrassônica possa ser difratada ao redor da descontinuidade e conseqüentemente aumentando o tempo de propagação da onda ultrassônica. São apresentados no Gráfico 22 os resultados médios obtidos de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

Gráfico 22 – Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como mostra o Gráfico 22, na idade de 7 dias é possível identificar um comportamento linear decrescente da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas à medida que é incrementado ARB à matriz do concreto, atingindo uma redução de até 9,9% e 8,8% em relação aos traços CB10A e CB10B, respectivamente. Para os traços com 5% de substituição houveram reduções menores, 6,5% para o traço CB5A e 5,4% para o traço CB5B. Percebe-se ainda que para as composições

que contém ARB de granulometria menor o decréscimo é ligeiramente superior, em torno de 1,2%. Para os resultados provenientes da idade de 28 também se percebe um comportamento inversamente proporcional com o aumento do teor de ARB, com exceção do traço CB10A, no entanto as taxas de redução são menores. Para os traços CB5A, CB7,5A e CB10A temos reduções de 3,3%, 4,8% e 4,3%, respectivamente, e 0,4%, 1,2% e 1,9% para os traços CB5B, CB7,5B e CB10B, respectivamente.

Já ao analisarmos o aumento da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas da idade de 7 dias para 28 dias, nos deparamos com os seguintes acréscimos: 1,2%, 4,7%, 4,6%, 7,5%, 6,7%, 7,3% e 8,9% respectivamente para os traços TR, CB5A, CB7,5A, CB10A, CB5B, CB7,5B e CB10B. Nota-se que o concreto referência teve o menor ganho, enquanto os traços com maiores teores de incorporação de ARB, concomitantemente aos traços com maior granulometria do ARB, obtiveram os maiores índices de crescimento, concordando com o comportamento obtido de evolução da resistência mecânica à compressão.

Em suma, os resultados apontaram para um decréscimo da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas a medida que foi aumentado o incremento do ARB, assim como os estudos de Albano et al., (2008), Marie (2015), Noor (2014), Sugapriya e Ramkrishnan (2018) e Wong e Ting (2009) demonstraram. Sugapriya e Ramkrishnan (2018) explicam que este comportamento indica um aumento da porosidade, bem como a redução da densidade do concreto contendo ARB, todavia, como foi evidenciado anteriormente, que o índice de vazios e a absorção capilar foram reduzidas ao introduzir ARB à matriz do concreto, o que então indica que o ARB por si só faz com que a densidade do concreto seja reduzida e conseqüentemente a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas também decaia.

A Tabela 14 denota valores de classificação da qualidade do concreto de acordo com o resultado obtido de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas proposta por Cánovas (1988), bem como pela IS 13311 (1992).

Tabela 14 – Qualidade do concreto em relação a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas - Cánovas (1988) e IS 13311 (1992)

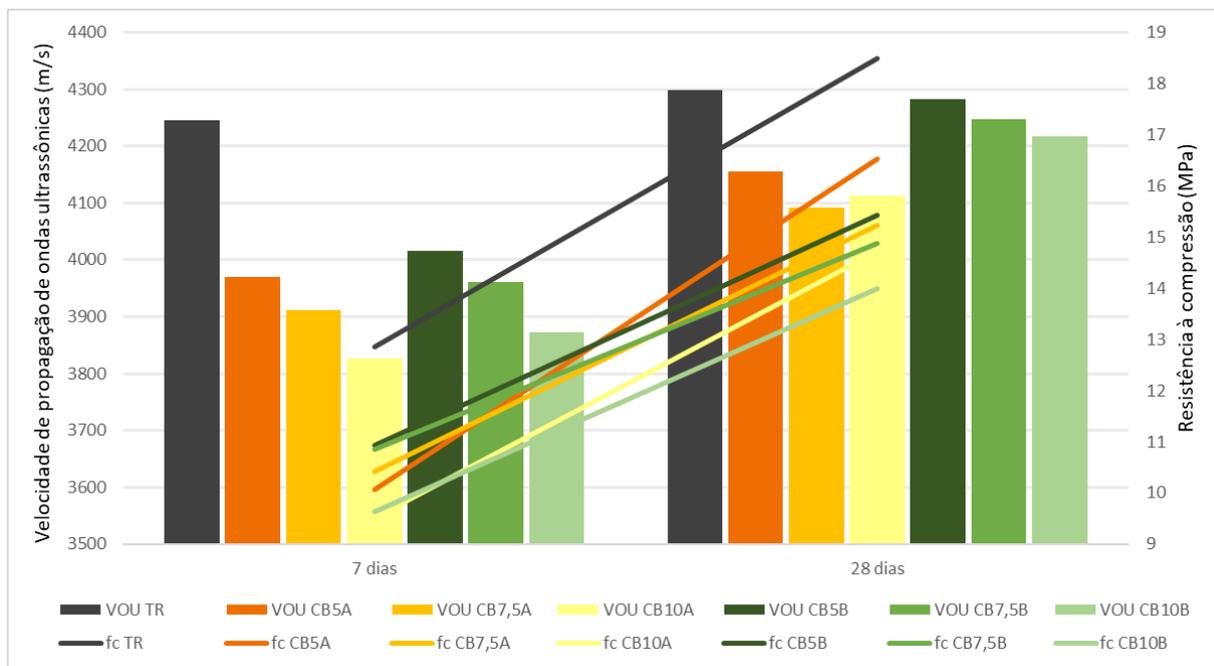
Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (m/s)	Qualidade do concreto pela IS 13311-92	Qualidade do concreto por Cánovas (1988)
Acima de 4500	Excelente	Excelente
4500-3500	Boa	Ótimo
3500-3000	Média	Bom
Inferior a 3000	Duvidosa	-
3000-2000	-	Regular
Inferior a 2000	-	Ruim

Fonte: Adaptada de Cánovas (1988) e IS 13311 (1992).

Analisando os dados providos da Tabela 14 e os resultados obtidos do Gráfico 22, todas as misturas em questão são classificadas como boas e ótimas segundo a IS 13311 (1992) e Cánovas (1988), respectivamente.

O Gráfico 23 traz a relação entre os valores de resistência à compressão e as respectivas velocidades de propagação de ondas ultrassônicas.

Gráfico 23 – Resistência mecânica à compressão e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível averiguar no Gráfico 23 que a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas acompanha o crescimento da resistência à compressão. Tal comportamento é constatado para todos os traços estudados.

Mohammed, Azmi e Abdullahi (2011) propuseram um modelo matemático que correlaciona a resistência mecânica à compressão e a velocidade de propagação de onda ultrassônica e obtiveram valores de R^2 superiores a 0,9905, tanto para a idade de 7 dias quanto aos 28 dias. Contudo Bogas, Gomes M. e Gomes A. (2013) salientam que o tipo de cimento e agregado utilizado na mistura do concreto tem influência direta nos valores de velocidade de propagação de onda ultrassônica e na resistência mecânica à compressão.

5 CONCLUSÕES

O intuito desse estudo foi promover a redução do consumo de recursos naturais e agregar valor a um resíduo que impacta fortemente na sociedade e no meio ambiente. Assim, buscou-se conhecer as características básicas do concreto, propriedades físicas e mecânicas, com a incorporação do ARB, avaliando a influência de diferentes teores de substituição do agregado miúdo e diferentes granulometrias do ARB.

No estado fresco foi avaliada a trabalhabilidade pelo método de abatimento do tronco de cone e observou-se uma redução para os concretos contendo ARB em relação ao concreto referência. Os resultados dos traços com incorporação de 5% do resíduo de borracha demonstraram reduções de até 23,5%, porém estes valores destoaram da linearidade demonstrada pelos traços com teores de 7,5% e 10% de substituição, que apresentaram uma proporcionalidade entre a adição do ARB e a perda da trabalhabilidade, sendo que os ARB de granulometria de 1 a 4mm proporcionaram as maiores perdas, sendo de 11,8% para o traço CB10B.

Em relação a resistência mecânica à compressão, notou-se uma redução para todos os traços contendo ARB, percebendo um decréscimo proporcional da resistência à medida que foi incrementado o resíduo de borracha, com exceção do resultado do traço CB5A aos 7 dias. No entanto, observou-se um comportamento diferenciado aos 7 dias e 28 dias. Aos 7 dias os traços com ARB de granulometria 0,7 a 2mm demonstraram as maiores reduções em relação ao traço referência, enquanto que aos 28 dias teve-se um comportamento contrário, posto que estes mesmos traços tiveram os melhores desempenhos em comparação aos traços com ARB de 1 a 4mm.

Já os resultados provindos do ensaio do módulo de elasticidade estático apontaram para um comportamento linear decrescente dos traços CB5A, CB7,5A e CB10A, entretanto os traços CB5B, CB7,5B e CB10B apresentaram comportamento aleatório, inviabilizando análises quanto ao desempenho do concreto com diferentes granulometrias do ARB.

Quanto a absorção de água por capilaridade, os resultados indicaram melhoras das propriedades, sendo que aos 28 dias todos os concretos contendo ARB tiveram valores similares. Tendo a absorção capilar efetiva como referência, obteve-se, no melhor caso, uma redução de 23,7% comparado ao concreto referência.

Considerando-se a relevância desse ensaio como uma predição da durabilidade do concreto, aponta-se para melhorias decorrentes do uso de ARB.

Todas as matrizes contendo o ARB apresentaram resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica menores com relação ao traço referência, no entanto se comportaram de maneira aleatória, não possibilitando a avaliação da influência do aumento do teor do ARB, salvo os valores de massa específica dos traços CB5A, CB7,5A e CB10A que denotaram proporcionalidade entre a redução da massa específica e o aumento do teor do ARB. Pode-se perceber ainda que as reduções foram maiores para os traços contendo ARB de menor granulometria.

Os dados obtidos de velocidade de propagação de ondas de ultrassom juntamente com os resultados do ensaio de massa específica, mostraram que os traços contendo ARB de granulometria de 1 a 4 mm apresentaram as menores perdas de densidade, e como foi constatado que o índice de vazios reduziu, o decréscimo da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas pode ser consequência das propriedades físicas da borracha, menos densa, e ainda devido à má ligação que possa existir entre o ARB e a matriz cimentícia, como já mencionado no item 2.3.2 desta pesquisa.

De forma geral, é possível evidenciar melhora de algumas propriedades dos concretos com ARB, indicando que a continuidade dos estudos com este material deve ser prosperada.

REFERÊNCIAS

AIELLO, M. A.; LEUZZI, F. Waste tyre rubberized concrete: properties at fresh and hardened state. **Waste Management**, [S.l.], v. 30, n. 8-9, p. 1696-1704, 2010.

ALBANO, C. et al. Estudio de concreto elaborado com caucho de reciclado de diferentes tamaños de partículas. **Revista de la Facultad de Ingeniería**, Caracas, Venezuela, v. 23, n. 1, p. 67–75, 2008.

ALBUQUERQUE, A. C. **Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu**. 2009. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ALBUQUERQUE, A. C. et al. Adição de borracha de pneu ao concreto convencional e compactado com rolo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC, 46., 2004, Florianópolis. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2004.

ALMEIDA, A. C. **Pneumáticos no Brasil: A lei dos resíduos sólidos e sua implementação**. 2015. 71 f. Trabalho de Conclusão do Curso de Especialização (Especialista em Direito Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Direito Ambiental Nacional e Internacional, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ALVES, V. E. S. et al. Impacto ambiental provocado pela destinação incorreta de pneus. **ENIAC Pesquisa**, [S.l.], v. 4, p. 162–175, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.1R-95**: In-place methods to estimate concrete strength. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1995. 41 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597-02**: Standard test method for pulse velocity through concrete. West Conshohocken: ASTM International, 2002. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016**. São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfmbbr>. Acesso em: 9 set. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: concreto: ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7212**: execução de concreto dosado em central: procedimentos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522**: concreto: determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8802**: concreto endurecido: determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9776**: agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45**: agregado miúdo: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52**: agregado graúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53**: agregados: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 67**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS (ANIP). **Livro branco da indústria de pneus**: uma política industrial para o setor. São Paulo, 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS (ANIP). **Matérias-primas**. 2013. Disponível em: <<http://www.anip.com.br/?cont=fabricacao>>. Acesso em: 4 out 2017.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS (ANIP). **Relatório de produção e vendas 2016**. 2017. Disponível em: <<http://www.anip.com.br/arquivos/producao-vendas.pdf>>. Acesso em: 7 out 2017.

ATAHAN, A. O.; YÜCEL, A. Ö. Crumb rubber in concrete: Static and dynamic evaluation. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 36, p. 617–622, 2012.

BANCO DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDS). **Pneus**. 34 p. Área de operações industriais 2 - Gerência setorial 2, 1998.

- BARROS, P. G. S. **Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito**. 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.
- BATAYNEH, M. K.; MARIE, I.; ASI, I. Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries. **Waste Management**, [S.l.], v. 28, n. 11, p. 2171–2176, 2008.
- BATISTA, G. DOS S. et al. Verificação do desempenho do concreto com adição de fibras de borracha provenientes da recapagem do pneu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2017.
- BEHERA, M. et al. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 68, p. 501–516, 2014.
- BIGNOZZI, M. C.; SANDROLINI, F. Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 36, n. 4, p. 735–739, 2006.
- BOGAS, J. A.; GOMES, M. G.; GOMES, A. Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. **Ultrasonics**, [S.l.], v. 53, n. 5, p. 962–972, 1 jul. 2013.
- BRASIL. **Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010a**. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm>. Acesso em: 18 ago. 2017.
- BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010b**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 9 set. 2017.
- BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm>. Acesso em: 15 set. 2017.
- BRIDGESTONE. **Bridgestone explica as estruturas do pneu**. Santo André, 2016 Disponível em: <<http://www.bridgestone.com.br/noticia6/bridgestone-explica-as-estruturas-do-pneu>>. Acesso em: 25 out. 2017.
- BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **IS 13311: Non-destructive testing of concrete – Methods of Test - Part 1: Ultrasonic pulse velocity**. New Delhi: Bureau Of Indian Standards, 1992.
- CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988. 522 p.

CARVALHO, J. D.V, **Dossiê Técnico: Fabricação e reciclagem de pneus**. Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Universidade de Brasília-CDT/UNB, Brasília, 2007.

CAVICHILLO, M. A.; HECKLER, K. I. L.; CAMPOS, H. C. Análise da incorporação de borracha de pneu em concreto como substituição parcial do agregado miúdo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2017.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM (CEMPRE). **Pneus | CEMPRE**. 2017. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/7/pneus>>. Acesso em: 12 set. 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 258, de 26 de agosto de 1999**. Determina que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/_arquivos/36_09102008030342.pdf>. Acesso em: 16 set. 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 301, de 21 de março de 2002**. Altera dispositivos da Resolução no 258, de 26 de agosto de 1999, que dispõe sobre Pneumáticos. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_2002_301.pdf>. Acesso em: 17 set. 2017.

Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009**. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res09/res41609.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2017.

COSTA, F. B. P. **Análise da durabilidade de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação reforçados com fibras**. 2015. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

EUROPEAN CHEMICALS AGENCY (ECHA). **Annex XV report: an evaluation of the possible health risks of recycled rubber granules used as infill in synthetic turf sports fields**. 71 p. 2017. Disponível em: <https://echa.europa.eu/documents/10162/13563/annex-xv_report_rubber_granules_en.pdf/dbcb4ee6-1c65-af35-7a18-f6ac1ac29fe4>. Acesso em: 28 out 2017

EUROPEAN TYRE & RUBBER MANUFACTURERS' ASSOCIATION (ETRMA). **Annual report 2017: Moving innovation that cares**. Saint-Josse-ten-Noode, Bélgica, 2017. Disponível em: <<http://www.etrma.org/library-2>>. Acesso em: 28 out 2017

EUROPEAN TYRE & RUBBER MANUFACTURERS' ASSOCIATION (ETRMA). **End-of-life tyre: Report 2015**. Saint-Josse-ten-Noode, Bélgica, 2015. Disponível em: <<http://www.etrma.org/library-2>>. Acesso em: 28 out 2017

FARHAN, A. H.; DAWSON, A. R.; THOM, N. H. Characterization of rubberized cement bound aggregate mixtures using indirect tensile testing and fractal analysis. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 105, p. 94–102, 2016.

FAZZAN, J. V.; PEREIRA, A. M.; AKASAKI, J. L. Estudo da viabilidade de utilização do Resíduo de Borracha de Pneu em Concretos. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S.l.], p. 118–132, 2016.

FERNANDES, S. E. et al. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 4, p. 909–923, dez. 2015.

FERREIRA, U. C. et al. Estudo da viabilidade mecânica da substituição parcial do agregado miúdo natural pela borracha de pneu moído para produção de matrizes de cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2017.

IORE, A. et al. On the fresh/hardened properties of cement composites incorporating rubber particles from recycled tires. **Advances in Civil Engineering**, Cairo, Egito, v. 2014, 2014.

FREITAS, C. et al. Desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 913–918, 2009.

FREITAS, M. S. et al. Estudo de concreto não estrutural produzido com resíduo de recauchutagem de pneu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2017.

GANJIAN, E.; KHORAMI, M.; MAGHSOUDI, A. A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 23, n. 5, p. 1828–1836, 2009.

GESOĞLU, M.; GÜNEYISI, E. Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume. **Materials and Structures**, [S.l.], v. 40, p. 953-964, 2007.

GIACOBBE, S. **Estudo do comportamento físico-mecânico do concreto de cimento portland com adição de borracha de pneus**. 2008. 106 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

GOMES FILHO, C. V. **Levantamento do potencial de resíduos de borracha no Brasil e avaliação de sua utilização na indústria da construção civil**. 2007. 138p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Engenharia do Paraná - IEP, Curitiba, 2007.

GRANZOTTO, A. **Concreto com adições de borracha**: Uma alternativa ecologicamente viável. 2010. 132 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Paraná, 2010.

GRANZOTTO, L.; SOUZA, R. A. Mechanical properties of structural concrete with partial replacement of fine aggregate by tire rubber. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 35, n. 1, p. 39–44, 2013.

GUO, S. et al. Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 148, p. 681–689, 2017.

GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, [S.l.] v. 73, p. 562–574, 2014.

HELENE, Paulo. Agresividad del medio y la durabilidad del hormigón. **Hormigón**, Buenos Aires, n. 10, p.25-35, 1983.

KALOUSH, K.; WAY, G.; ZHU, H. Properties of crumb rubber concrete. **Transportation Research Record**, Washington, EUA, v. 1914, n. 1, p. 8–14, 2005.

KHAN, R. et al. Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 30, p. 360–365, 2012.

KIRCHHEIM, A. P. et al. Estudo da absorção capilar em argamassas de cimento Portland branco estrutural com diferentes teores de adições pozolânicas. In: Entac, São Paulo, 2004.

LAGARINHOS, C. A. F. **Reciclagem de Pneus**: Análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa. 2011, 291 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. Logística reversa dos pneus usados no Brasil. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 23, n. 1, p. 49–58, 2013.

LEUNG, H. Y. et al. Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 113, p. 369–375, 2016.

LI, YUE.; LI, YAQIANG. Experimental study on performance of rubber particle and steel fiber composite toughening concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 146, p. 267–275, 2017.

LIMBACHIYA, M.; MEDDAH, M. S.; OUCHAGOUR, Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 27, n. 1, p. 439–449, 2012.

LIU, F. et al. Dynamic mechanical behaviour of recycled crumb rubber concrete materials subjected to repeated impact. **Materials Research Innovations**, [S.l.], v. 19, n. S8, p. S8-496-S8-501, 2015.

LIU, F. et al. Mechanical and fatigue performance of rubber concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 47, p. 711–719, 2013.

LIU, F. et al. Study of impact performance of rubber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 36, p. 604–616, 2012.

MALEŠEV, M.; RADONJANIN, V.; MARINKOVIĆ, S. Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. **Sustainability**, Basel, Suíça, v. 2, n. 5, p. 1204–1225, 2010.

MANGWANDI, C. **Particle size monitoring**. [S.l., 2017?]. Disponível em: <<https://www.innopharmalabs.com/tech/applications-and-processes/particle-size-monitoring>>. Acesso em: 8 mai. 2018

MARANO, G. C. et al. Il rubbercrete Analisi delle proprietà fisico-meccaniche e durabilità. **inCONCRETO**, [S.l.], n. 114, p. 1–16, 2013. Disponível em: <<https://www.inconcreto.net/2960-il-rubbercrete-un-calcestruzzo-alternativo-con-particelle-di-pneumatici-fuori-uso>>. Acesso em: 14 set. 2017.

MARIE, I. Zones of weakness of rubberized concrete behavior using the UPV. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], p. 1–6, 2015.

MATTIOLI, L. M. L. et al. **Plano de gerenciamento integrado de resíduos pneumáticos – PGIRPN**. 44 p. Fundação Estadual do Meio Ambiente e Fundação Israel Pinheiro, Belo Horizonte, 2009

MEDEIROS, M. H. F. et al. Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos. Rem: **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 66, n. 1, p. 59–65, mar. 2013.

MEHERIER, M. S. **Investigation of mechanical and durability properties of cement mortar and concrete with varying replacement levels of crumb rubber as fine aggregate**. 2016. 127 f. Thesis (Degree of Master of Applied Science) - University of British Columbia, Kelowna, Canadá, 2016.

MEHERIER, M. S., Alam, M. S., & Banthia, N. **Mechanical behavior of cement mortar with varying replacement level of crumb rubber**. The Fifth International Conference on Construction Materials, ConMat'15, Whistler, BC, Canadá, 2015.

MILLER, N. M.; TEHRANI, F. M. Mechanical properties of rubberized lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 147, p. 264–271, 30 ago. 2017.

MOHAMMED, B. S.; AZMI, N. J.; ABDULLAHI, M. Evaluation of rubbercrete based on ultrasonic pulse velocity and rebound hammer tests. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 25, n. 3, p. 1388–1397, 2011.

MUTTASHAR, M.; WEENA, L.; WARNA, K. **Geopolymer concrete: the green alternative with suitable structural properties**. 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23). 2014.

NAJIM, K. B.; HALL, M. R. A review of the fresh/hardened properties and applications for plain- (PRC) and self-compacting rubberised concrete (SCRC). **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 24, n. 11, p. 2043–2051, 2010.

NICÁCIO, R. **Projeto de Lei proíbe queima de pneus em manifestações dentro do RN**. 2016. Disponível em: <<https://oportaln10.com.br/projeto-de-lei-proibe>>

queima-de-pneus-em-manifestacoes-dentro-do-rn-53644/>. Acesso em: 13 mai. 2018.

NOOR, N. B. **Physical performance and durability evaluation of rubberized concrete**. 2014. 114 f. Dissertation (Doctor of Engineering) – Kyushu University, Fukuoka, Japan, 2014.

OSPINA, H. A. T. **Valoración De propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho**. 2014. 237 f. Trabajo de grado (Magister en Ingeniería Civil) Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colômbia, 2014.

PALMEIRA, M. **Saiba do que um pneu é composto**. 2015. Disponível em: <<https://www.gfpneus.com.br/blog/saiba-do-que-um-pneu-e-composto/>>. Acesso em: 25 out. 2017.

PARRA, C. V.; NASCIMENTO, A. P. B.; FERREIRA, M. L. Reutilização e reciclagem de pneus, e os problemas causados por sua destinação incorreta. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2010, São Paulo; ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 10., 2010, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Universidade Nove de Julho, 2010.

PELLISSARI, V. **Propriedades de concretos produzidos através da utilização de agregados reciclados de concreto**. 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2016.

PEREIRA, A. M. et al. Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 227–238, mar. 2015.

PEREIRA, T. P. **Estudo do concreto de alto desempenho com adição de borracha**. 2016. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2016.

PINHEIRO, I. DE C. et al. Estudo comportamental de concreto de cimento portland produzido com resíduos de pneu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2017.

PINTO, A. R. M. et al. Gerenciamento de pneus inservíveis: Estudo da reciclagem e destinação. **Meio Ambiente e Sustentabilidade**, [S.l.], v. 10, n. 6, p. 37–57, 2017.

REDA TAHA, M. M. et al. Mechanical, fracture, and microstructural investigations of rubber concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, EUA, v. 20, n. 10, p. 640–649, 2008

REISCHNER, K. **Scrap tire recycling**. 2008. Disponível em: <http://entire-engineering.de/Scrap_Tire_Recycling.pdf>. Acesso em: 28 out. 2017.

RESENDE, L. D. et al. Formulação de concretos de baixa densidade a partir do uso misto de agregado do beneficiamento de pneus inservíveis e do agregado graúdo de

argila expandida. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2017.

RILEM TC 116 PCD. Permeability of concrete as a criterion of its durability. Concrete durability – an approach towards performance testing. **Materials and Structures**, [S.I.], v. 32, n. 4, p. 174-179, 1999.

SANTIN, M. et al. Estudo da aplicabilidade de um sistema de gestão ambiental em uma recauchutadora. **Maringá Management**, Maringá, v. 4, n 1, p. 15-26, 2007.

SANTOS, A. C. **Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneus com aplicação em placas pré-moldadas**. 2017. 135 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2005.

SANTOS, G. R. F. DOS et al. Análise de concreto com adição de resíduo de borracha de pneu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2017.

SANTOS, R. M. **Efeito da adição de partículas de borracha de pneus nas propriedades físico-mecânicas de compósito cimentício**. 2012. 175 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do São João Del-Rei. Departamento de Engenharia Mecânica. São João Del-Rei, 2012.

SÃO THIAGO, P. F. **Estudo da utilização de agregados de pneus inservíveis em concreto para aplicação em pisos intertravados**. 2017. 99 f. (Mestrado Profissional em Materiais) - Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2017.

SCHIMELFENIG, B. et al. Estudo da utilização de agregado reciclado de borracha de pneus (ARBP) como substituição da areia natural em concretos convencionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2017.

SHANKAR, K. G.; RAO, G. V. R. Variation of sorptivity in diverse grades of concrete proportioned with fly ash, woodhusk ash and rice husk ash. **International Research Journal of Engeneering and Technology (IRJET)**, Tamil Nadu, Índia, v. 4, n. 12, p. 1626–1633, 2017.

SI, R.; GUO, S.; DAI, Q. Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-Solution treated rubber particles. **Construction and Building Materials**, [S.I.], v. 153, p. 496–505, 30 out. 2017.

SILVA JUNIOR, F. A. **Avaliação do efeito da adição de resíduo de borracha de pneu e brita calcária na formulação de compósitos cimentícios**. 2014. 184 f. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos; Processamento de Materiais a part) - Universidade Federal do Rio

Grande do Norte, Natal, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/12867>>. Acesso em: 8 ago 2017

SILVA JÚNIOR, F. A. et al. Concreto com resíduo de borracha de pneu e brita granítica. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECiMat, 22., Natal. **Anais eletrônicos...** Natal, n. 1, p. 3182–3193, 2016.

SILVA, S. K. M. et al. Estudo de concretos produzidos com substituição de agregado miúdo natural por agregado de borracha vulcanizada, proveniente da recapagem de pneus. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2017.

SILVEIRA, P. M. et al. Estudo do comportamento mecânico do concreto com borracha de pneu. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 416–428, jun. 2016.

SU, H. et al. Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 91, p. 288–296, 2015.

SUGAPRIYA, P.; RAMKRISHNAN, R. Crumb rubber recycling in enhancing Damping properties of concrete. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.l.], v. 310, p. 12013, 2018.

THOMAS, B. S. et al. Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 59, p. 204–212, 2014.

THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C. Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 102, p. 78–87, 1 set. 2015.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. Comparativo das propriedades do concreto autoadensável (CAA) utilizando areia fina e cinza volante. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 247–276, jun. 2011.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Basel convention: Technical guidelines for the environmentally sound management of used and waste pneumatic tyres**. 57 p. Cartagena, Colombia, 2011.

VALDERRAMA, C. P.; TORRES AGREDO, J.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. Características de desempenho de un concreto adicionado con cenizas volantes de alto nivel de quemados. **Ingeniería e Investigación**, Bogotá, Colômbia, v. 31, n. 1, p. 39–46, 2011.

VELOSO, Z. M. F. **Ciclo de vida dos pneus**. 24p. Brasília: MMA, 2010. Disponível em: <<http://inmetro.gov.br/painelsetorial/palestras/Zilda-Maria-Faria-Veloso-Ciclo-Vida-Pneus.pdf>>. Acesso em: 8 set. 2017

WASTE & RESOURCES ACTION PROGRAMME (WRAP); Environmental Agency. **Tyre-derived rubber materials**. 47 p. Banbury, Reino Unido, 2007. Disponível em:

<<https://www.pharosproject.net/uploads/files/sources/1828/1330040519.pdf>>.
Acesso em: 28 out. 2017.

WONG, S. F.; TING, S. K. Use of recycled rubber tires in normal and high-strength concretes. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, EUA, v. 106, n. 4, p. 325–332, 2009.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **The cement sustainability initiative: Recycling Concrete**. 42 p. Washington, United States, 2009.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD); International Energy Agency (IEA). **Cement technology roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050**. 36 p. Washington, United States, 2009.

YUNG, W. H.; YUNG, L. C.; HUA, L. H. A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 41, p. 665–672, 2013.

ZHANG, H. et al. Effect of rubber particle modification on properties of rubberized concrete. **Journal Wuhan University of Technology**, [S.l.], v. 29, n. 4, p. 763–768, 2014.

ZHANG, S. P.; ZONG, L. Evaluation of relationship between water absorption and durability of concrete materials. **Advances in Materials Science and Engineering**, Cairo, Egito, v. 2014, 2014.

APÊNDICE A – SÍNTESE DOS RESULTADOS

Variáveis	Idade	Traço						
		TR	CB5A	CB7,5A	CB10A	CB5B	CB7,5B	CB10B
Abatimento do tronco de cone (mm)	-	170	130	165	155	150	155	150
Resistência à compressão (MPa)	7 dias	12,8	10,1	10,4	9,5	10,9	10,8	9,6
	28 dias	18,5	16,5	15,2	14,7	15,4	14,9	14,0
Módulo de Elasticidade (GPa)	28 dias	29,5	24,9	23,8	23,0	25,8	22,8	26,1
Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (m/s)	7 dias	4246	3969	3911	3827	4015	3960	3873
	28 dias	4298	4156	4092	4114	4282	4248	4217
Absorção total de água (%)	28 dias	6,6	5,8	5,7	5,8	6,0	6,3	6,2
Índice de vazios (%)	28 dias	13,6	11,5	11,2	11,4	11,8	12,6	12,3
Massa específica real (kg/m³)	28 dias	2374,8	2240,2	2234,8	2210,4	2253,3	2274,4	2269,9
Resistência capilar (h/m²)	7 dias	9676	8033	6123	4900	6276	5680	7353
	28 dias	7152	6653	6977	5989	7506	6841	6489
Taxa de absorção capilar (g/mm².vh)	7 dias	11,73	8,93	9,74	9,46	10,78	10,60	11,36
	28 dias	7,29	6,12	5,91	6,07	6,10	6,00	5,87
Absorção efetiva (g/cm³)	7 dias	0,117	0,083	0,080	0,070	0,089	0,083	0,100
	28 dias	0,064	0,052	0,051	0,050	0,055	0,052	0,048