



UNIVERSIDADE SÃO JUDAS

**Valorização de borracha de pneu modificada como agregado
reciclado em compósitos à base de cimento**

Dissertação de Mestrado
apresentada à comissão Avaliadora
do Mestrado Profissional em
Engenharia Civil da Universidade
São Judas Tadeu.

Roberta dos Santos Celestino

Orientador: Professor Doutor Mostafa Galal Abdelfattah Mohamed Aboelkheir

São Paulo

2021

**Valorização de borracha de pneu modificada como agregado
reciclado em compósitos à base de cimento**

Dissertação de Mestrado
apresentada à comissão Avaliadora
do Mestrado Profissional em
Engenharia Civil da Universidade
São Judas Tadeu.

Orientador: Professor Dr. Mostafa
G. Aboelkheir

Roberta dos Santos Celestino

São Paulo

2021

Ficha catalográfica

Celestino, Roberta dos Santos

Valorização de borracha de pneu modificada como agregado reciclado em compósitos à base de cimento / Roberta dos Santos Celestino - São Paulo, 2021.

p. 108

Dissertação (Mestrado) – Universidade São Judas Tadeu, Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação Stricto Sensu – 2021.

Orientador: Professor Doutor Mostafa Galal Abdelfattah Mohamed Aboelkheir.

1. Borracha de pneu. 2. Desvulcanização UV. 3. NaOH. 4. Recuperação ambiental. 5. Argamassa.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Mostafa G. Aboelkheir pela orientação, paciência e empenho em ajudar nesta etapa, sem ele este trabalho não seria possível.

À todos os professores que passaram pela minha trajetória, cada um teve seu papel em meu crescimento acadêmico.

Aos técnicos de laboratório da Universidade São Judas: Regina, Fernando e Clayton pela disponibilidade e colaboração na realização dos ensaios experimentais.

Aos meus pais, que sempre apoiaram minhas decisões e por estarem ao meu lado em todos os momentos, mesmo aqueles de muito estresse.

À minha ex-chefe Érika Pena, pois sem o incentivo e apoio dela esta pesquisa não seria iniciada.

À todos meus amigos que tornaram essa jornada mais leve, principalmente a Caroline Cardoso e a Carolina Afonso por todo encorajamento.



UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil

Defesa da dissertação de mestrado de Roberta dos Santos Celestino, intitulada: “Valorização de borracha de pneu modificada como agregado reciclado em compósitos à base de cimento”, orientada pelo Professor Doutor Mostafa Galal Abdelfattah Mohamed Aboelkheir, apresentado à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil no dia.

Os membros da Banca Examinadora consideram o candidato _____

Banca Examinadora

Professor Doutor Mostafa Galal Abdelfattah Mohamed Aboelkheir – Universidade São Judas Tadeu

Professor Doutor Fernando Gomes de Souza Jr. – Instituto de Macromoléculas:
Professora Eloisa Mano (IMA/UFRJ)

Professora Doutora Cláudia Terezinha Kniess – Universidade São Judas Tadeu

Resumo

Uma grande quantidade de borracha de pneu é descartada de maneira incorreta por falta de alternativas de reciclagem, aumentando assim, o risco ao meio ambiente e à saúde pública em todo o mundo. Uma das alternativas de valorização da borracha é sua utilização na construção civil pela inserção em matrizes cimentícias. Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma argamassa de revestimento através de substituições volumétricas do agregado fino (areia) por borracha de pneu triturada e tratada via irradiação ultravioleta (UV) e NaOH, separadamente. Ainda, a desvulcanização da borracha de pneu via irradiação UV foi estudada. As amostras de borracha foram submetidas a diferentes tempos de exposição à irradiação UV (1h, 3h, 6h, 12h, 24h, 36h, 48h). Para a caracterização da borracha, foram realizados ensaios de ângulo de contato, grau de reticulação, espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), calorimetria exploratório diferencial (DSC), análise termogravimétrica (TGA/DTG). Estudou-se, também, o tratamento da borracha via imersão em solução de NaOH em diferentes tempos (30, 40 e 50 min). Após o tratamento dos grupos de amostra, caracterizou-se as propriedades mecânicas da argamassa modificada com borracha. Os estudos mostraram que o tratamento da borracha de pneu via NaOH atingiu melhores resultados na molhabilidade da borracha, e também de resistência à compressão e a tração na flexão. Para 50 minutos de imersão em NaOH, o valor encontrado de ângulo de contato foi de 96° , enquanto para 24h de exposição à irradiação UV o valor foi de 110° . A amostra NaOH40-10 obteve um aumento de 8,6% de resistência à compressão em relação à amostra de borracha sem tratamento com o mesmo teor de adição (REF-B10), enquanto a amostra NaOH40-15 atingiu um aumento de 3,54% em relação à amostra REF-B15. Ao mesmo tempo, a amostra NaOH30-15 obteve um aumento de 3,47% na resistência à tração na flexão em relação à amostra REF-B15. As amostras tratadas via exposição à irradiação UV não obtiveram resultados satisfatórios no ganho de resistência. Buscando uma mistura de alta deformabilidade e ainda que tenha um valor aceitável na resistência à compressão, destacam-se as misturas com borracha tratada por imersão em NaOH com 40 minutos em até 15% de substituição.

Palavras-chave: Borracha de pneu, desvulcanização UV, NaOH, recuperação ambiental, argamassa.

Abstract

A large amount of tire rubber is incorrectly disposed of due to a lack of recycling alternatives, thus increasing the risk to the environment and public health around the world. One of the alternatives for valuing rubber is its use in civil construction through its insertion in cement matrices. This work has as main objective to develop a coating mortar through volumetric replacements of fine aggregate (sand) by crushed tire rubber and treated by ultraviolet irradiation (UV) and NaOH, separately. Furthermore, the devulcanization of tire rubber via UV irradiation was studied. The rubber samples were subjected to different times of exposure to UV irradiation (1h, 3h, 6h, 12h, 24h, 36h, 48h). For the characterization of rubber, tests were performed on contact angle, degree of crosslinking, FTIR, DSC, TGA/DTG. The treatment of rubber via immersion in NaOH solution at different times (30, 40 and 50 min) was also studied. After treating the sample groups, the mechanical properties of the rubber-modified mortar were characterized. The studies showed that the treatment of tire rubber via NaOH achieved better results in the wettability of the rubber, as well as in compressive strength and flexural traction. For 50 minutes of immersion in NaOH, the contact angle value found was 96° , while for 24h exposure to UV irradiation the value was 110° . The NaOH40-10 sample obtained an 8.6% increase in compressive strength compared to the untreated rubber sample with the same addition content (REF-B10), while the NaOH40-15 sample achieved an increase of 3.54 % in relation to sample REF-B15. At the same time, sample NaOH30-15 obtained a 3.47% increase in flexural tensile strength compared to sample REF-B15. The samples treated via exposure to UV irradiation did not obtain satisfactory results in terms of strength gain. Seeking a mixture with high deformability and even though it has an acceptable value in compressive strength, the mixtures with rubber treated by immersion in NaOH with 40 minutes in up to 15% replacement stand out.

Keywords: Tire rubber, devulcanization via ultraviolet irradiation, NaOH, environmental recovery, mortar.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UV	Ultravioleta
SBR	Borracha de estireno-butadieno (<i>Styrene-butadiene rubber</i>)
GTR	Borracha de pneu moída (<i>Ground Tire Rubber</i>)
FTIR	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (Fourier Transform Infrared Spectroscopy-Attenuated Total Reflection)
DSC	Calorimetria Exploratório Diferencial (Differential Scanning Calorimetry)
TGA	Análise Termogravimétrica (Thermogravimetric Analysis)
DTG	Termogravimetria derivada (Derivative Thermogravimetry)

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Composição química dos materiais secos.....	48
Tabela 2 - Proporção das misturas de argamassa.....	55
Tabela 3 - Índice dos modos de vibração dos espectros FTIR de borracha de pneu após a exposição à radiação UV em diversos períodos	63
Tabela 4 - Dados de decomposição térmica da borracha de pneu após a exposição à irradiação UV, estimados a partir de curvas de DTG.	65
Tabela 5 - Dados de decomposição térmica da borracha de pneu após a exposição à irradiação UV, estimados a partir de curvas de TGA.	67
Tabela 6 - Dados de mudança da entalpia de degradação de borracha de pneu após a exposição à irradiação UV, estimados a partir de curvas de DSC.	68
Tabela 7 - Representação numérica da resistência à compressão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu sem tratamento.	70
Tabela 8 - Representação numérica da resistência à compressão (MPa) para as misturas de controle e com borracha tratada por imersão em NaOH por 30, 40 e 50 minutos. .	71
Tabela 9 - Representação numérica da resistência à compressão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas.	73
Tabela 10 - Representação numérica da resistência à tração na flexão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu sem tratamento.....	75
Tabela 11 - Representação numérica da resistência à tração na flexão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu tratada a 30, 40 e 50 minutos por imersão em NaOH, separadamente.....	77
Tabela 12 - Representação numérica da resistência à tração na flexão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas.	79
Tabela 13 - Representação numérica da densidade aparente (kg/m ³), velocidade de propagação (mm/μs) e módulo de elasticidade dinâmico (MPa) para as misturas de controle e com a adição de borracha de pneu sem tratamento com diferente teores. ..	81

Tabela 14 - Dados da densidade aparente, velocidade de propagação e módulo de elasticidade dinâmico (MPa) para as misturas sem e com borracha tratada a 30, 40 e 50 minutos por imersão em NaOH, separadamente..... 83

Tabela 15 - Dados da densidade aparente, velocidade de propagação e módulo de elasticidade dinâmico (MPa) para as misturas sem e com borracha tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas 85

Lista de Figuras

Figura 1 - Consumo mundial da borracha.....	20
Figura 2 - Total de vendas de pneus no Brasil no período entre 2017 e 2020.....	21
Figura 3 - Estrutura do monômero e polímero da borracha natural.....	22
Figura 4 - Transformação da estrutura da borracha natural em borracha vulcanizada	23
Figura 5 – Borracha estireno-butadieno (SBR).....	24
Figura 6 - Composição de pneus para automóveis.....	25
Figura 7 - Comparação entre imagens antigas e recentes do maior aterro de pneus do mundo localizado no Kuwait.	26
Figura 8 - Incêndio em aterro de pneus inservíveis	27
Figura 9 - Hierarquia da gestão de resíduos sólidos na União Europeia.....	30
Figura 10 - Panorama do coprocessamento no Brasil no ano de 2020	31
Figura 11 - Asfalto borracha	33
Figura 12 - Curva de DTG para as amostras de borracha sem tratamento e tratadas via microondas.....	36
Figura 13 - Perfis de gotículas de água na superfície de pó de borracha tratadas com NaOH: (a) 1%, (b) 4%, (c) 7% e (d) 10%.....	38
Figura 14 - Micrografia de fratura por tração de compósitos com pó de borracha tratadas com NaOH a 7%.	38
Figura 15 - Mecanismos para os métodos de tratamento de superfície com solução de NaOH	39
Figura 16 - Densidades de reticulação de v-IR e v-SBR com diferentes tempos de tratamento.....	41
Figura 17 – Mecanismo de: a) vulcanização do SBR; b) degradação termo-oxidativa do SBR e c) desvulcanização do SBR.....	42
Figura 18 - Perda de massa total de carbono e enxofre nas amostras v-SBR via tratamento UV.....	43
Figura 19 - Influência da borracha (GTR) na resistência à compressão do concreto ..	45

Figura 20 - Influência da borracha (GTR) na resistência ao impacto	45
Figura 21 - Fluxograma referente a parte experimental realizada	47
Figura 22 - Curva de distribuição granulométrica dos materiais secos.....	48
Figura 23 - Câmara de irradiação UV.....	49
Figura 24 - Tratamento das amostras via processo químico (a) imersão em NaOH; (b) lavagem em água; (c) amostra encaminhada a estufa.	50
Figura 25 - Amostra de borracha antes de ser desvulcanizada na câmara UV.	51
Figura 26 - Esquema da montagem do sistema de lixiviação	52
Figura 27 - Analizador de forma de gota Krüss modelo DSA 100	53
Figura 28 - Amostras compactadas	54
Figura 29 – Esquema do procedimento de: moldagem das amostras (a), desmoldagem das amostras (b) e cura em imersão em água (c).....	56
Figura 30 - Amostras de borracha de pneu após tratamento via irradiação UV.	58
Figura 31 - Gotas d'água em superfície GTR sem tratamento	58
Figura 32 - Mudança no ângulo de contato da borracha de pneu após diferentes tempos de exposição à irradiação UV: (a) até 24 h e (b) até 48 h.	59
Figura 33 - Comparação entre o formato da gota após tratamento com NaOH: (a) 30 min e (b) 40 min e (c) 50 min.....	60
Figura 34 - Mudança no ângulo de contato da borracha de pneu após diferentes tempos de tratamento com NaOH.....	61
Figura 35 - Mudança no grau de reticulação da borracha de pneu após diferentes tempos de exposição à irradiação UV: (a) até 24 h e (b) até 48 h.	62
Figura 36 - Bandas de absorção de FTIR de v-SBR após a exposição à irradiação UV em diversos períodos.....	64
Figura 37 - Curvas TG/DTG de borracha de pneu após diferentes tempos de exposição à irradiação UV.	66
Figura 38 - Curvas TG/DTG, com aproximação, de borracha de pneu após diferentes tempos de exposição à irradiação UV.	66

Figura 39 - Mudança na entalpia de degradação da borracha de pneu após diferentes tempos de exposição à irradiação UV: (a) até 24 h e (b) até 48 h.....	68
Figura 40 - A influência da adição da borracha na resistência à compressão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu sem tratamento.	70
Figura 41 - A influência da adição da borracha tratada por imersão em NaOH por: (a) 30 minutos; (b) 40 minutos e (c) 50 minutos na resistência à compressão (MPa).....	72
Figura 42 - A influência da adição da borracha na resistência à compressão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas.....	74
Figura 43 - A influência da adição da borracha na resistência à tração na flexão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu sem tratamento.	76
Figura 44 - A influência da adição da borracha na resistência à tração na flexão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu tratada a 30, 40 e 50 minutos por imersão em NaOH, separadamente.....	78
Figura 45 - A influência da adição da borracha na resistência à tração na flexão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas.....	80
Figura 46 - A influência da adição de borracha no valor do módulo de deformação dinâmico (MPa) das misturas de controle para as misturas de controle e com a adição de borracha de pneu sem tratamento com diferente teores.	82
Figura 47 - A influência da adição da borracha tratada em NaOH por: (a) 30 minutos; (b) 40 minutos e (c) 50 minutos no módulo de deformação dinâmico (MPa).	84
Figura 48 - A influência da adição da borracha tratada via irradiação UV por 12 horas no módulo de deformação dinâmico (MPa).....	85

Sumário

Resumo.....	5
Abstract	6
Lista de Tabelas.....	8
Lista de Figuras	10
1.Introdução	15
1.1 Problematização	17
1.2 Justificativa.....	18
1.3 Objetivos.....	19
2 Referencial Teórico	20
2.1 Produção Mundial da borracha.....	20
2.2 Borracha Natural	21
2.3 Vulcanização	22
2.4 Elastômeros de estireno-butadieno (SBR).....	23
2.5 Borracha de pneu	24
2.6 Impactos ambientais do resíduo da borracha de pneu	25
2.7 Gestão de Resíduos Sólidos.....	27
2.8 Legislação Relacionada	29
2.9 Destinação final de pneus	30
2.9.1 Na geração de energia	31
2.9.2 Pirólise.....	32
2.9.3 Construção civil	32
2.9.4 Regeneração da borracha	33
2.10 Desvulcanização	34
2.11 Concreto Emborrachado	44

3	Materiais e Métodos	47
3.1	Materiais	47
3.2	Métodos	49
3.2.1	Modificação da borracha	49
3.2.2	Caracterização da borracha de pneu via irradiação ultravioleta.....	51
3.2.3	Dosagem, Preparo e Cura.....	54
3.2.4	Propriedades Mecânicas.....	56
4	Resultados e Discussões	58
4.1	Ângulo de contato.....	58
4.2	Grau de reticulação.....	61
4.3	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	63
4.4	TGA-DTG	65
4.5	DSC	67
4.6	Resistência à compressão.....	69
4.7	Resistência à tração na flexão	75
4.8	Módulo de elasticidade dinâmico	81
5	Conclusões.....	87
6	Sugestões de trabalhos futuros	89
7	Participação em produção acadêmica.....	89
8	Referências	91

1. Introdução

A industrialização promoveu o consumo excessivo de matérias-primas, e conseqüentemente, o aumento exponencial do volume de resíduos gerados (POURRE, 2016; SERRANO, 2009). No último século há uma grande preocupação com a quantidade gerada e a destinação final inadequada dos resíduos, devido aos impactos ambientais negativos que estes causam no planeta (PAGOTO, 2018; SANTOS et al., 2011).

O tema desenvolvimento sustentável começou a ser discutido em Estocolmo em 1972, e foi reafirmado em 1992, na Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (ECO-92), no Rio de Janeiro. Desde então, o termo sustentabilidade vem ganhando espaço nos debates sobre desenvolvimento (ACSELRAD, 1999; ARAÚJO, 2006; CORRÊA, 2009; DANTAS, 2018).

Atualmente, a noção de sustentabilidade não possui uma conformidade em sua definição devido às distintas interpretações (ACSELRAD, 1999; ARAÚJO, 2006). Porém, o conceito mais aceito internacionalmente, é o do Relatório Brundtland: Nosso Futuro Comum (1987), onde foi estabelecido que o desenvolvimento sustentável é “aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas necessidades” (ARAÚJO, 2006; COMISSÃO MUNDIAL SOBRE O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1991; CORRÊA, 2009; GONÇALVES et al., 2014; RIO+20, 2013).

O desenvolvimento sustentável deve operar em três dimensões da sustentabilidade: ambiental, econômica e social - Triple Bottom Line. Deve haver um equilíbrio entre essas três dimensões; com ações ambientalmente responsáveis, socialmente justas, economicamente viáveis” (ELKINGTON, 1998; MOTTA; AGUILAR, 2009). Para isso, são necessárias mudanças na produção, consumo e descarte de materiais (YEMAL; TEIXEIRA; NÄÄS, 2012).

Foram criadas legislações ambientais para a prevenção e redução dos resíduos, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que estabelece as responsabilidades dos geradores e do poder público referente ao gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010). A conscientização da população na hora da compra, escolhendo um produto ambientalmente correto, também estimula as indústrias a

buscarem alternativas para reduzir os danos ambientais no processo produtivo de seus produtos (BROLLO; SILVA, 2001; MAZZER; CAVALCANTI, 2004; SILVA, 2016).

Dentre os setores empresariais, o setor construtivo atua de forma ativa para o desenvolvimento econômico do país, porém promove grandes impactos no meio ambiente, devido a quantidade expressiva de recursos naturais que utiliza, e de resíduos sólidos que são gerados (MACÊDO; MARTINS, 2015; QUEIROGA; MARTINS, 2015).

Os pneus inservíveis são resíduos perigosos, pois além do longo tempo para sua decomposição, ele gera problemas ambientais e de saúde pública. Apesar de não ser um resíduo da construção civil, os pneus podem ser reaproveitados neste segmento proporcionando um material com diferentes propriedades mecânicas e também, beneficiar a sociedade com a redução deste resíduo no meio ambiente (LEMOS, 2019).

O conceito de economia circular vem com o objetivo de reduzir a extração dos recursos naturais desenfreada e aumentar a reutilização dos materiais, a fim de diminuir a quantidade de resíduos produzidos e os impactos ambientais (COSENZA; ANDRADE; ASSUNÇÃO, 2020; FLORIANI; CADORE FURLANETTO; SEHNEM, 2016). A economia circular visa aproveitar e valorizar os produtos e matérias-primas por um longo período, transformando o que antes seria um resíduo em um novo produto ou matéria-prima a ser utilizado (SANTOS, 2017).

A fim de ganhar vantagem competitiva, as empresas adotam estratégias de gestão ambiental como a certificação de gestão ambiental através da norma internacional ISO 14001 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), que é uma ferramenta que mostra o compromisso ambiental das empresas (EPELBAUM, 2004). Essa certificação vem sendo utilizada como um critério na hora da compra do consumidor, tornando a empresa certificada atrativa (MAZZER; CAVALCANTI, 2004).

Neste trabalho serão discutidos os problemas referentes a geração de resíduos sólidos, especificamente dos pneus inservíveis e a logística reversa desse tipo de resíduo.

1.1 Problematização

A borracha é uma fonte de matéria prima de extrema importância para a indústria mundial, sendo utilizada para diversas finalidades. Essa diversificação de aplicações é devido ao processo de vulcanização pelo qual a borracha passa para adquirir um aumento em suas propriedades mecânicas (CANEVAROLO JR., 2013; PAULO; SARON, 2009; PRODÓSSIMO, 2021).

A taxa média de crescimento anual da produção mundial da borracha foi de 2,8%, totalizando 29,04 milhões de toneladas em 2018 (CONAB, 2019). O aumento de resíduos, provenientes deste material, está diretamente ligado ao crescimento do consumo de produtos industrializados acarretando impactos ambientais significativos.

A borracha de pneu está entre os materiais poliméricos mais nocivos, pois possui um elevado tempo para sua deterioração e o seu descarte inadequado causa graves problemas ambientais e de saúde pública, como a contaminação do ar, solo e lençóis freáticos e a propagação de doenças (zika, dengue e chikungunya). No Brasil, os pneus fabricados pelas indústrias representam danos ao meio ambiente pelo acúmulo de resíduo em cerca de 100 milhões de pneus (COSSA; SIRQUEIRA; SOARES, 2009; MOTTA, 2008; SERRANO, 2009).

A reutilização da borracha de pneu na construção civil é estudada para amenizar os impactos tanto da borracha de pneu como da construção civil, no meio ambiente. Os ganhos referentes a reutilização da borracha serão discutidos na continuação da dissertação.

A reciclagem de materiais para serem utilizados em novas funções é uma alternativa para a redução da quantidade de lixo que é descartada no meio ambiente. O interesse sobre o problema da destinação de pneus inservíveis vem crescendo tanto no meio acadêmico como no meio empresarial. Sendo uma das abordagens para o problema o retorno desse produto ou resíduo para a cadeia produtiva (BAUER et al., 2015). Algumas técnicas de reutilização dos pneus são: recauchutagem, pirólise e adição em formulação de asfaltos (COSSA; SIRQUEIRA; SOARES, 2009; PACHECO-TORRES et al., 2018).

Para a reciclagem de pneus inservíveis é feita a trituração dos mesmos, para a utilização do pó da borracha em matrizes poliméricas ou cimentícias como agregado

reciclado. O aproveitamento de pneu moído em asfalto emborrachado, mostra-se uma escolha ambientalmente apropriada, que pode apresentar notáveis reduções de volume desse resíduo (CURY et al., 2003; PAULO; SARON, 2009; SHU; HUANG, 2014).

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, constituído de água, aglomerante, agregados e aditivos. Suas vantagens são o custo baixo em sua produção, durabilidade e a possibilidade de se modelar de diversas formas. Entretanto, ele possui algumas deficiências como baixa ductilidade e retração plástica (FIGUEIREDO, 2011).

A borracha quando inserida em misturas à base de cimento, pode afetar negativamente as propriedades mecânicas do concreto: resistência à compressão, tração e flexão. Porém, ela pode aperfeiçoar a ductilidade, relação de amortecimento e dissipação de energia dentro da mistura. Alguns comportamentos do agregado após a adição devem ser melhor estudados. Existem métodos criados por alguns pesquisadores para reduzir ou eliminar esses efeitos negativos, como tratamentos físico-químicos de superfície da borracha (ABOELKHEIR, 2019; GERGES; ISSA; FAWAZ, 2018; NUNES, 2015; PISTOR et al., 2010; SCURACCHIO; WAKI; BRETAS, 2006; SILVA; WAKI; SCURACCHIO, 2005).

A borracha vulcanizada é apolar enquanto a suspensão de cimento é polar, e isso faz com que não haja uma boa adesão entre esses materiais ao se misturarem. A utilização de um tratamento de superfície na borracha tende a melhorar essa adesão (ABOELKHEIR, 2019). Para garantir a eficácia do tratamento, é necessário realizar a caracterização da borracha, e após essa confirmação, pode ser inserida à base de cimento. A caracterização da argamassa modificada é essencial para estabelecer as aplicações viáveis desse novo material.

1.2 Justificativa

Com o número excessivo de pneus inservíveis gerados, uma grande quantidade de borracha de pneu é descartada de maneira incorreta por falta de alternativas de reciclagem, aumentando assim, o risco ao meio ambiente e à saúde pública em todo o mundo.

A utilização da borracha de pneu como agregado reciclado em matrizes cimentícias contribui para a diminuição da extração da areia, que é um recurso natural

muito explorado pelo setor construtivo, além de valorizar um resíduo sólido de difícil descarte.

A borracha de pneu sem tratamento prévio combinada com cimento, resulta em uma mistura com baixa adesão, devido a diferença de polaridade entre os componentes, promovendo um produto com baixa aplicabilidade.

Se a borracha for tratada por métodos físico-químicos antes da mistura com cimento, isso pode ajudar na diminuição dos problemas mencionados e, ao mesmo tempo, melhorar as propriedades mecânicas, térmicas e acústicas de misturas cimentícias modificadas com borracha de pneu.

Existem diferentes estudos referente aos métodos de tratamento prévio da borracha de pneu, como a desvulcanização por processo químico, biológico e físico. Neste projeto a pesquisa concentra-se na irradiação UV que é considerada uma técnica limpa e de fácil aplicação e no tratamento via imersão em uma solução de NaOH para efeito de comparação.

1.3 Objetivos

O objetivo geral do projeto é desenvolver uma argamassa de revestimento através de substituições volumétricas do agregado fino por borracha de pneu triturada e tratada via irradiação ultravioleta e NaOH, separadamente. Para isso, foram definidos os objetivos específicos, descritos a seguir:

- 1) Estudar o processo de desvulcanização da borracha via irradiação ultravioleta.
- 2) Definir o melhor teor de substituição do agregado fino pela borracha tratada.
- 3) Estudar a influência de adição de borracha de pneu com e sem tratamento nas propriedades mecânicas da argamassa.
- 4) Analisar a viabilidade da utilização das técnicas envolvidas no tratamento prévio da borracha de pneu.

2 Referencial Teórico

O presente tópico tem como objetivo mostrar a importância de buscar alternativas para a borracha de pneu inservível com enfoque no tratamento prévio da mesma, para a utilização em compósitos à base de cimento.

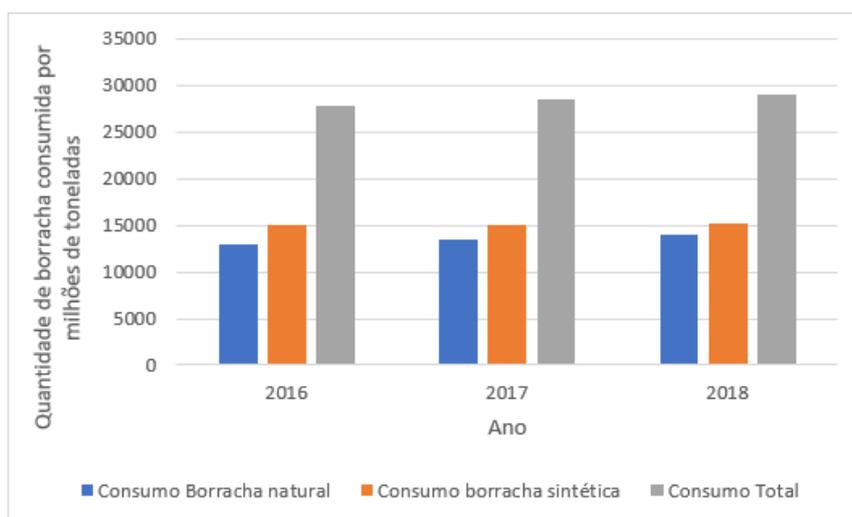
Primeiramente será exposto o impacto ambiental causado pela borracha de pneu e, em seguida, algumas alternativas de aplicação da borracha. Depois disso, serão apresentadas mais informações sobre o tratamento prévio da borracha de pneu e sua aplicabilidade na construção civil.

2.1 Produção Mundial da borracha

A borracha possui algumas características físico-químicas que a tornam extremamente versátil para diversas aplicações. Com isso, a borracha transformou-se em uma matéria-prima importantíssima para o desenvolvimento industrial no final do século XIX (MARTIN; ARRUDA, 1993).

A produção mundial da borracha cresceu a uma taxa de 2,8% em 2018, totalizando 29,04 milhões de toneladas, em comparação a 28,25 milhões de toneladas em 2017 (CONAB, 2019). O consumo da borracha em 2018 aumentou 4,3% em relação a 2017, com um total de 29,3 milhões de toneladas, como pode ser observado na Figura 1 (PENNACCHIO, 2019).

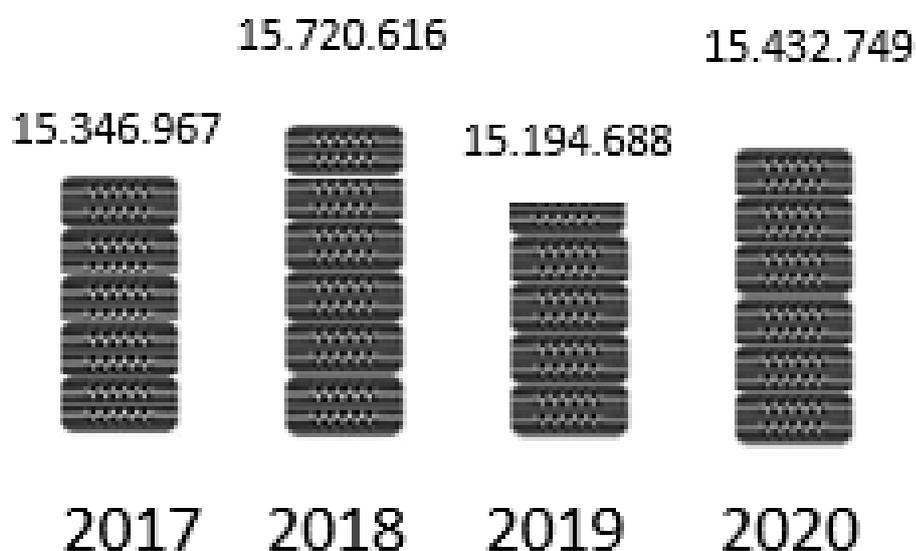
Figura 1 - Consumo mundial da borracha



Fonte: Adaptado de (IRSG, 2018).

A Figura 2 mostra o total de vendas nacionais de pneus, em milhares de unidades, com referência no 3º trimestre entre os anos 2017 e 2020 (ANIP, 2018).

Figura 2 - Total de vendas de pneus no Brasil no período entre 2017 e 2020.



Fonte: Adaptado de (ANIP, 2020).

Cerca de 450 mil toneladas de pneus são descartadas, somente no Brasil por ano. Esse resíduo sólido possui uma grande quantidade de borracha, que se não descartada corretamente, pode tornar-se um problema ambiental devido ao longo tempo de decomposição no meio ambiente (MACHIN; PEDROSO; DE CARVALHO, 2017).

2.2 Borracha Natural

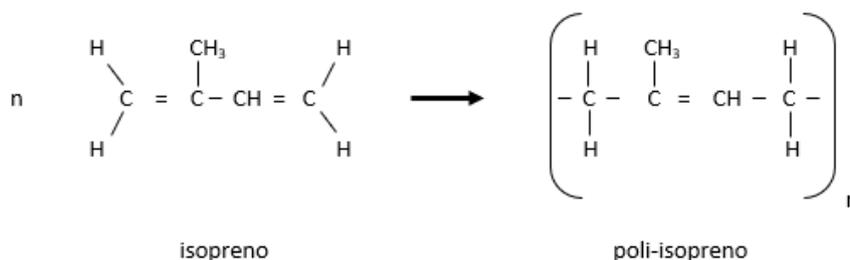
A borracha natural é uma macromolécula formada pelo monômero isopreno obtido pela retirada de látex da seringueira (árvore *Hevea Brasiliensis*), natural da região amazônica (DALL'ANTONIA et al., 2006; MORCELI, 2015; MORENO et al., 2003).

Para a extração da seiva, são feitos cortes superficiais no tronco da árvore. O material é coletado em recipientes, após recolhido, o material coagula e seca. Para tornar-se borracha, o látex passa por um processo de aquecimento e tratamento com outras substâncias químicas (MORCELI, 2015).

O látex possui 35% de poli-isopreno, que é o polímero correspondente a borracha natural. Na Figura 3 observa-se o monômero da borracha, de fórmula molecular C₅H₈, e o polímero equivalente a borracha natural (poli-isopreno).

A borracha crua possui algumas características desfavoráveis como a solubilidade em solventes orgânicos, baixa resistência à tração, ao calor e à variação de temperatura. Em temperaturas baixas, a borracha se torna dura e quebradiça, enquanto em temperaturas altas, ela amolece. Em seu estado natural, é um material extremamente versátil para a indústria mundial, devido à grande quantidade de aplicações que a mesma possui (ESCÓCIO et al., 2004; RIPPEL; BRAGANÇA, 2009).

Figura 3 - Estrutura do monômero e polímero da borracha natural



Fonte: Autor, 2020.

2.3 Vulcanização

A borracha é considerada um elastômero, pois após a aplicação de uma tensão, ela recupera rapidamente a sua forma inicial, possuindo um comportamento elástico. A borracha não vulcanizada possui baixo módulo de elasticidade e de limite de resistência à deformação e tração, baixa resistência à abrasão, etc. Quando vulcanizada, essas propriedades são melhoradas (GONSALEZ; SANTANA, 2012).

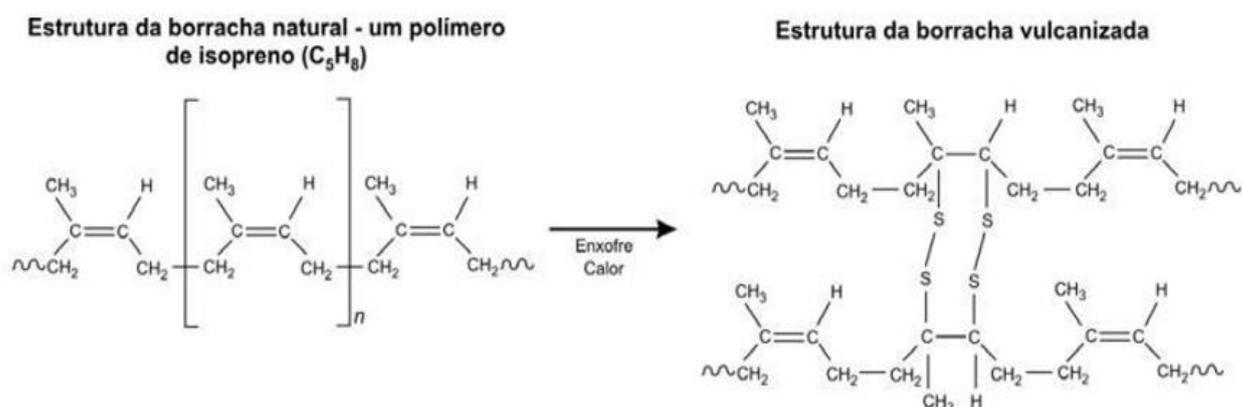
Charles Goodyear descobriu acidentalmente o método de vulcanização pela adição de enxofre na borracha derretida. O novo material produzido possui átomos de enxofre unindo as estruturas lineares, formando pontes de enxofre, tornando o polímero tridimensional (OLIVEIRA et al., 2016).

A vulcanização é um processo de reticulação, onde as cadeias poliméricas são interligadas por ligações covalentes. São formadas as ligações cruzadas, produzindo

assim, polímeros com estruturas tridimensionais e alta massa molecular (OLIVEIRA et al., 2016; SILVA, 2021). A vulcanização da borracha é a adição de enxofre na presença de um catalisador a alta temperatura, tornando-a um polímero tridimensional com uma maior resistência e dureza, como pode ser observado na Figura 4 (SOUZA et al., 2018).

A borracha vulcanizada possui diversas aplicações devido ao aumento de sua dureza no processo. Sua aplicação dependerá da quantidade de enxofre incorporado. Quanto maior o teor de enxofre adicionado à borracha, maior será a sua dureza (MARTINS, 2005).

Figura 4 - Transformação da estrutura da borracha natural em borracha vulcanizada

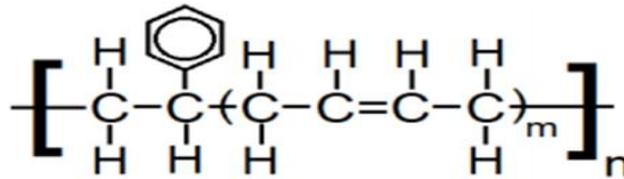


A transformação do elastômero em um polímero termofixo impossibilita que o mesmo possa ser remoldado por aquecimento, dificultando a sua reciclagem e causando problemas ambientais relacionados ao descarte indevido dos rejeitos elastoméricos, como os pneus inservíveis (GONSALEZ; SANTANA, 2012).

2.4 Elastômeros de estireno-butadieno (SBR)

O SBR é produzido a partir da copolimerização do butadieno com estireno na proporção de 3:1, aproximadamente (Figura 5). É a borracha sintética de maior volume do mundo, sendo a indústria de pneus a consumidora dominante de SBR, correspondendo a 75 - 80% da demanda total em 2015. O SBR também é utilizado em aplicações automotivas, em diversos produtos de borracha moldada e extrudada, calçados, entre outros bens de consumo (CEH, 2020).

Figura 5 – Borracha estireno-butadieno (SBR)



Fonte: (ABOELKHEIR, 2019).

2.5 Borracha de pneu

Após a descoberta do processo de vulcanização por Goodyear (1830), o engenheiro Robert Thomson utilizou borracha juntamente com incorporação de ar nas rodas de carruagem para reduzir o barulho e torná-las mais macias, e patenteou assim, o pneu pneumático (ANIP, 2018; POURRE, 2016).

Para a fabricação do pneu, a borracha é vulcanizada, passando por um processo onde ela é posicionada em um molde sob uma prensa a uma certa temperatura e pressão, garantindo assim, as propriedades físicas e consistência do material (POURRE, 2016).

Segundo a ANIP, os irmãos Michelin patentearam os pneus para automóveis em 1845. Em 1888, foram fabricados pneus para bicicletas, e em 1906 o primeiro pneu de avião foi lançado. Desde então, os pneus tornaram-se indispensáveis para a performance dos veículos, sendo assim, fabricados em larga escala pelas indústrias (ANIP, 2018).

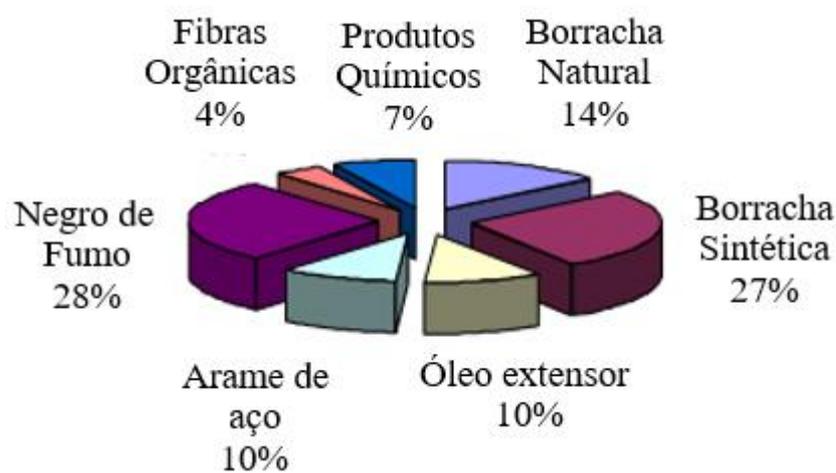
A fabricação de pneus no Brasil começou com o Plano Geral de Viação Nacional, concretizado em 1936, com a instalação da Companhia Brasileira de Artefatos de Borracha, produzindo 29 mil pneus, em seu primeiro ano de funcionamento (AZEVEDO, 2011; RABELO, 2017).

No final da década de 80, o Brasil já havia fabricado mais de 29 milhões de pneus. A partir de então, o número de fábricas de pneu no Brasil cresceu, sendo quatro delas internacionais: Bridgestone Firestone, Goodyear, Pirelli e Michelin. O Brasil encontra-se em sétimo lugar na produção de pneus para automóveis e em quinto para pneus de caminhões e ônibus. No país, 50% da borracha utilizada é empregada para a

fabricação de pneus (GOLDENSTEIN; ALVES; BARRIOS, 2007; KAMIMURA, 2002; RABELO, 2017).

O principal componente dos pneus é a borracha, com cerca de 40% de seu peso, sendo ela natural e sintética, para garantir as propriedades elásticas e estabilidade térmica, respectivamente (Figura 6) (AZEVEDO, 2011; KAMIMURA, 2002).

Figura 6 - Composição de pneus para automóveis



Fonte: (KAMIMURA, 2002).

2.6 Impactos ambientais do resíduo da borracha de pneu

Um tema bastante atual que vem ganhando notoriedade e muita preocupação, é a destinação final de resíduos sólidos, pois quando descartados indevidamente os prejuízos para o meio ambiente e para a população são inestimáveis (AZEVEDO, 2011; RABELO, 2017).

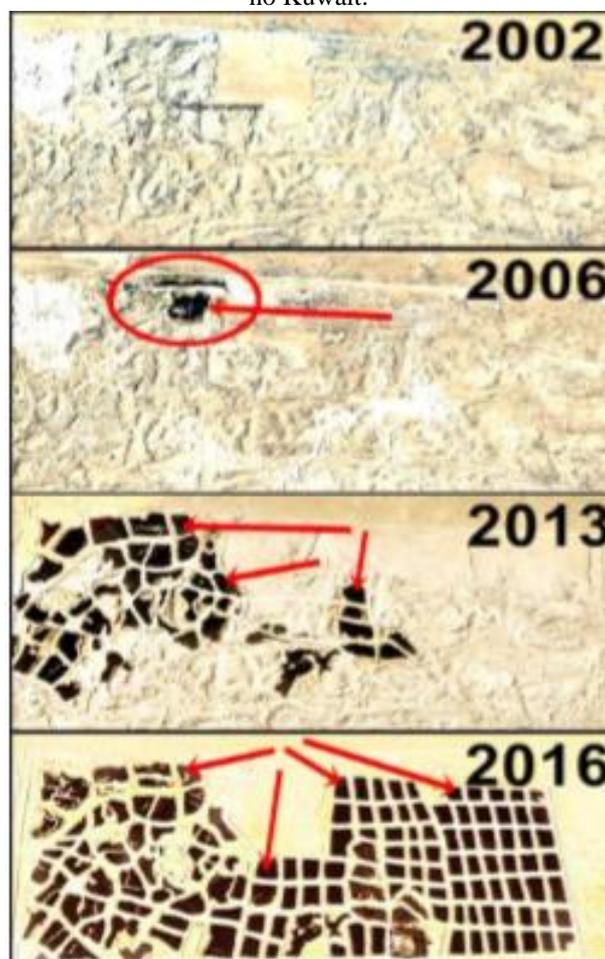
Com o consumo excessivo de matérias-primas no último século, existe uma dificuldade na gestão dos resíduos produzidos no mundo, devido à eliminação dos mesmos de forma incorreta. Diariamente, milhares de resíduos são descartados em lixões e corpos d'água de maneira indevida. Dentre tantos resíduos, um que vem ganhando ênfase entre os ambientalistas, é o pneu que não possui mais condição de uso (POURRE, 2016).

O descarte de pneus em aterros sanitários faz com que os aterros possuam uma vida útil curta, devido à incompressibilidade dos pneus. A taxa de aumento no número de pneus em aterros, é facilmente observada pela Figura 7, onde compara-se o mesmo aterro por imagens capturadas via satélite entre 2002 e 2016.

A quantidade demasiada de pneus descartados juntamente com o seu elevado tempo para deterioração (ABOELKHEIR, 2019; COSSA; SIRQUEIRA; SOARES, 2009). Quando descartado inadequadamente apresenta diversos problemas, como:

- **Problemas de saúde pública:** o descarte dos pneus em céu aberto pode acumular água por um grande intervalo de tempo devido a sua impermeabilidade, favorecendo a reprodução de insetos transmissores de doenças, como a chikungunya, dengue e zika, causadas pelo *Aedes Aegypti* (FGV, 2020).

Figura 7 - Comparação entre imagens antigas e recentes do maior aterro de pneus do mundo localizado no Kuwait.



Fonte: (ABOELKHEIR, 2019).

- **Problemas ambientais:** a borracha presente no pneu é altamente inflamável, portanto, quando queimado (Figura 8), o pneu libera substâncias tóxicas que penetram facilmente no solo e lençóis freáticos, contaminando assim o solo, a água, além da poluição atmosférica (ABOELKHEIR, 2019; RABELO, 2017).

Cada pneu queimado libera 10 litros de óleo, liberando assim hidrocarbonetos aromáticos e dioxinas, chamados Poluentes Orgânicos Persistentes (POP 's). Essas toxinas, quando inaladas por muito tempo, podem causar até câncer de fígado (ABOELKHEIR, 2019).

Figura 8 - Incêndio em aterro de pneus inservíveis



Fonte: Getty Images, 2019.

2.7 Gestão de Resíduos Sólidos

O crescimento populacional urbano desenfreado ao longo dos anos resultou na transformação do ambiente urbano, e também do meio ambiente. A industrialização acelerada e sem planejamento, provocou a utilização dos recursos naturais de forma desordenada, como sendo ilimitados, e a geração de resíduos cresceu exponencialmente

durante o processo de produção até o final da vida útil dos produtos (MACÊDO; MARTINS, 2015).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos define resíduos sólidos como qualquer material, substância, objeto ou bem descartado, oriundos das atividades humanas em sociedade, encontrados no estado sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos que necessitam de um tratamento prévio antes de serem despejados nos cursos d'água (BRASIL, 2010).

De acordo com a NBR 10004, os resíduos sólidos são classificados da seguinte maneira:

- **Classe I – Resíduos perigosos:** são aqueles que apresentam risco de periculosidade, possuindo características de corrosividade, inflamabilidade, patogenicidade, reatividade ou toxicidade.
- **Classe II – Resíduos não perigosos:** são aqueles que não se enquadram como perigosos (classe I) e são divididos em: classe II A – Não inertes e classe II B – inertes.
- **Classe II A – Resíduos não inertes:** são aqueles que não apresentam periculosidade, porém não são inertes, podem ter propriedades como biodegradabilidade ou solubilidade em água.
- **Classe II B – Resíduos inertes:** são aqueles que, quando submetidos a testes de solubilidade, nenhum de seus constituintes solubilizados apresentaram concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

A gestão incorreta na destinação final dos resíduos sólidos provenientes das atividades humanas acarreta problemas ambientais, sociais e econômicos. Para a redução desses resíduos, a Lei nº 12.305/10 propõe o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos, bem como uma adequação na destinação final dos rejeitos (BRASIL, 2010).

O reuso e a reciclagem de materiais contribuem para a redução da extração dos recursos naturais, para o aumento do ciclo de vida útil dos produtos, bem como, dos

aterros sanitários (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2013; RODRIGUES JORGE; FERREIRA; CLARO NETO, 2004).

Alguns resíduos possuem componentes de decomposição lenta, como os plásticos, borrachas, vidros, etc. Isso dificulta a reintegração desses elementos na natureza, provocando assim, um grave problema para o meio ambiente (POURRE, 2016; RODRIGUES, 2008). A borracha, além de ser um resíduo sólido de lenta decomposição, possui ligações cruzadas em sua estrutura e estabilizantes, tornando-a um resíduo de difícil reutilização.

De acordo com a NBR 10.004, os pneus inservíveis são considerados Resíduos Classe II – Não Inertes, pois são materiais de difícil degradação e possuem alta combustibilidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

2.8 Legislação Relacionada

Um dos grandes desafios no Brasil é o gerenciamento de resíduos sólidos, devido ao consumo desenfreado de produtos, provocando uma extração desordenada dos recursos naturais para a fabricação destes, e também, um descarte irregular dos resíduos sólidos gerados (CIMINO; ZANTA, 2005; NASCIMENTO et al., 2015).

No Brasil, estima-se que pelo menos 50% dos pneus produzidos são descartados inadequadamente (SERRANO, 2009). Com o número crescente na produção, e também, no descarte de pneus no meio ambiente, houve a necessidade de criação de uma legislação voltada para o destino desses pneus no Brasil (AZEVEDO, 2011; JOHN, 2000; POURRE, 2016).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) criou leis referente às responsabilidades dos fabricantes e importadores sobre coleta, destino e disposição final adequada dos pneus inservíveis, através das Resoluções CONAMA nº 258/99 e 301/02 (CIMINO; ZANTA, 2005; POURRE, 2016; RODRIGUES, 2008).

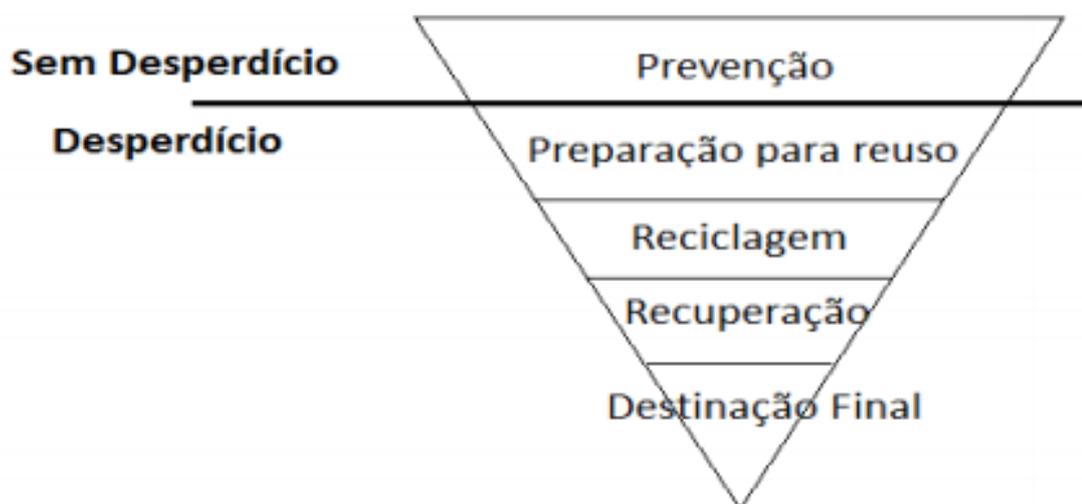
A Associação Nacional da Indústria de Pneus (ANIP) iniciou em 1999, o Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis. A Reciclanip foi criada

em 2007, e é responsável pela logística reversa, pós-consumo dos pneus inservíveis. Existem 1053 pontos de coleta de pneus inservíveis em todo o Brasil (RECICLANIP, 2020).

A União Europeia também possui suas leis referentes ao descarte de pneus inservíveis. A Diretiva Europeia 1999/31/EC, aprovada em abril de 1999, proíbe o depósito de pneus nos aterros sanitários (MAVROULIDOU; FIGUEIREDO, 2013; POURRE, 2016).

Em 2008, foi criada a Diretiva Europeia 2008/98/EC, onde propõe-se uma gestão hierárquica dos resíduos sólidos. Esses são examinados, e separados em prevenção, reutilização, reciclagem, recuperação e destinação final, como pode ser observado na Figura 9 (MAMEDE, 2013; POURRE, 2016).

Figura 9 - Hierarquia da gestão de resíduos sólidos na União Europeia.



Fonte: (POURRE, 2016).

2.9 Destinação final de pneus

O pneu possui um lento processo de degradação, podendo demorar até 600 anos para decomposição completa no meio ambiente. Por esse motivo, a pesquisa referente ao aproveitamento da borracha de pneu inservível aumentou

consideravelmente nos últimos anos (ABOELKHEIR, 2019; BAUER et al., 2015; COSSA; SIRQUEIRA; SOARES, 2009; DANTAS, 2018; MAVROULIDOU; FIGUEIREDO, 2013; NUNES, 2018; RODRIGUES, 2008).

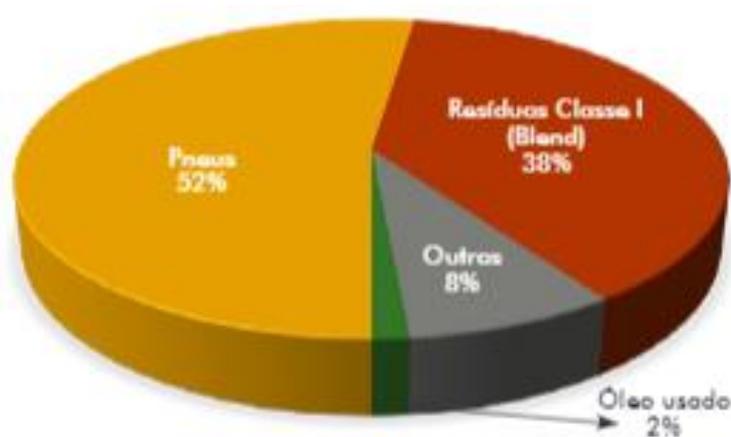
Para reduzir os impactos negativos referentes ao descarte dos pneus inservíveis, o material pode ser reaproveitado de diferentes formas. A borracha presente no pneu pode ser utilizada na fabricação de tapetes para automóveis, na produção de solas de sapato, além de pisos industriais, para quadras poliesportivas e asfalto-borracha (DAMASCENA, 2018; RECICLANIP, 2020).

A seguir serão descritas algumas aplicações realizadas a partir de pneus inservíveis.

2.9.1 Na geração de energia

Uma das principais alternativas para a destinação da borracha é o coprocessamento na geração de energia (Figura 10). Essa tecnologia é muito utilizada no Brasil, pois o pneu inservível substitui o consumo de combustíveis fósseis. A energia é gerada a partir da queima do pneu, podendo ele ser inteiro ou triturado. Indústrias cimentícias utilizam o pneu nos fornos de clínquer, pois ele possui um valor comburento maior do que o carvão mineral (32,6 MJ/kg contra 18,6 a 27,9 MJ/kg) (MOTTA, 2008).

Figura 10 - Panorama do coprocessamento no Brasil no ano de 2020



Fonte: (ABPC, 2019).

2.9.2 Pirólise

No método da pirólise, há uma decomposição térmica dos materiais na ausência de oxigênio. Os produtos obtidos na pirólise podem ser utilizados como combustíveis ou como matéria-prima para as indústrias (PARADELA, 2012; SCHWALM; RANGEL; MACIEL, 2020).

A pirólise é uma alternativa a destinação dos pneus inservíveis, pois trabalha em atmosfera inerte, o que evita a formação de gases tóxicos e poluentes. E produz três parcelas com distintas capacidades de aplicação (SOUZA; D'AGOSTO, 2013). A parcela gasosa pode ser utilizada na geração de energia; a líquida, composta principalmente por hidrocarbonetos, como combustíveis; e a parcela sólida, resíduo composto por carbono amorfo e matéria inorgânica (cinzas), pode ser utilizada como combustível, como carvão ativado ou carvão fino (GUPTA et al., 2014; QUEK; BALASUBRAMANIAN, 2013; SCHWALM; RANGEL; MACIEL, 2020; WILLIAMS, 2013).

A pirólise no Brasil é utilizada, por exemplo, pela PETROSIX no Paraná. Em 1998, a Petrobrás desenvolveu uma tecnologia de pirólise para produção de óleo e gases combustíveis empregando pneus inservíveis misturados com a rocha de xisto pirobetuminoso (ANDRADE, 2007; LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008).

2.9.3 Construção civil

A borracha começou a ser utilizada no asfalto a mais de 40 anos nos Estados Unidos, revestindo mais de 70% da malha viária do Arizona. Na França começou a ser utilizado a partir de 1982 em pistas de pouso e autoestradas. Já no Brasil, somente a partir de 2000 o pó da borracha foi aplicado em asfalto nas rodovias (Figura 11) (RODRIGUES, 2008).

A preparação do asfalto emborrachado deve ser feita a quente, bem como sua aplicação. O custo do asfalto ecológico é maior que o asfalto convencional, porém além da utilização de um resíduo, a borracha possui característica elástica, o que melhora as propriedades do asfalto (RODRIGUES, 2008).

Figura 11 - Asfalto borracha



Fonte: Folha de São Paulo, 2014.

A utilização de borracha na construção civil tem um emprego notável devido suas características, como elasticidade, capacidade de absorção de energia e isolamento acústico e térmico (ABOELKHEIR et al., 2021a; KURZ et al., 2018; NUNES, 2018; THOMAS; GUPTA, 2016; YOUSSEF et al., 2014).

O uso da borracha no cimento Portland possui problemas de incompatibilidade devido a diferença de polaridade que esses materiais apresentam. Pesquisadores sugeriram algumas formas de reduzir ou eliminar os efeitos desfavoráveis. E, atualmente, são estudadas maneiras de aperfeiçoar as propriedades e desempenho do concreto emborrachado (ABOELKHEIR et al., 2021a; CHOU et al., 2007; GERGES; ISSA; FAWAZ, 2018; KURZ et al., 2018; NUNES, 2018).

2.9.4 Regeneração da borracha

Existem diversos estudos sobre diferentes processos de regeneração da borracha, entre eles processos físicos, químicos e biológicos. Algumas das tecnologias estudadas são químicas, de micro-ondas, ultrassom e microrganismos (ABOELKHEIR et al., 2021b; MOTTA, 2008; PAULO; SARON, 2009).

O processo de desvulcanização da borracha é uma técnica de ruptura das ligações químicas cruzadas das substâncias presentes na mesma. As técnicas possuem custos diferentes, porém com o mesmo objetivo, de quebrar as ligações químicas (POURRE, 2016). Esse processo faz com que a borracha recupere algumas características originais e crie radicais livres em sua estrutura, podendo assim haver um ganho de polaridade no elastômero em questão (SILVA, 2015).

No Brasil, utiliza-se borracha em alguns pavimentos asfálticos, porém o resíduo da borracha de pneu não passa por um processo de regeneração, é utilizado pó de borracha de pneus reformados (MOTTA, 2008).

A seguir será exposto mais detalhadamente sobre a regeneração da borracha pela desvulcanização, que é o objetivo deste estudo, e suas diferentes técnicas.

2.10 Desvulcanização

Os elastômeros possuem algumas propriedades únicas do material, como a capacidade de sofrer deformação e voltar ao estado original. O processo de vulcanização provoca a formação de ligações químicas cruzadas, transformando o elastômero em um polímero termofixo, ou seja, perde a capacidade de ser remoldado em alta temperatura (JAUNICH; STARK, 2009; PAULO; SARON, 2009).

A incapacidade de conformação térmica da borracha vulcanizada, dificulta a reciclagem dos resíduos da mesma, o que acarreta em graves problemas ambientais devido ao descarte indevido destes materiais. Algumas pesquisas vêm sendo aprofundadas em relação às alternativas de reciclagem de pneus inservíveis (ARTÍÑANO et al., 2017; BAUER et al., 2015; PAULO; SARON, 2009).

A desvulcanização tem o objetivo de recuperar a habilidade de conformação térmica do material. Existem estudos sobre diferentes técnicas para a quebra das ligações cruzadas, como processos biológicos, físicos, mecânicos, químicos, entre outros (SCURACCHIO; WAKI; BRETAS, 2006; SILVA, 2015).

O processo de desvulcanização não reverte apenas a vulcanização, como ocorre várias alterações na molécula do material, fazendo com que a borracha tenha propriedades diferentes da borracha original, antes da vulcanização. Algumas mudanças

na estrutura da molécula são: a quebra das ligações cruzadas (normalmente de átomos de enxofre), quebra de ligações da cadeia principal, formando ramificações, reduzindo assim a massa molar do polímero e provocando o aparecimento de radicais livres (SCURACCHIO; WAKI; BRETAS, 2006; SILVA, 2015).

O tratamento de desvulcanização utilizado em escala industrial no Brasil é o chamado “método químico”, por ele usar reagentes químicos, ele não é ambientalmente favorável, e possui um baixo teor de desvulcanização. Muitas técnicas estão sendo estudadas e desenvolvidas em busca de um processo em que a quebra das ligações cruzadas seja o mais metuculoso possível (SILVA, 2015).

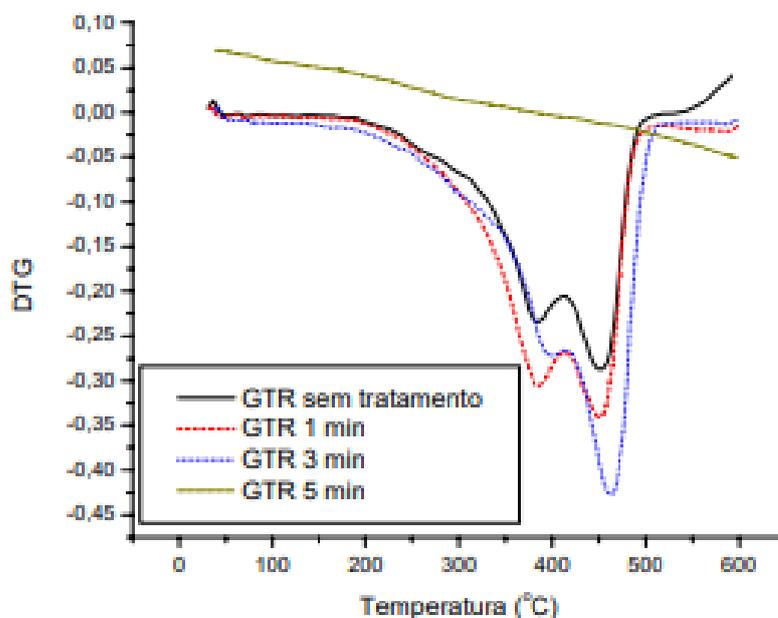
A seguir são descritas diferentes técnicas de desvulcanização da borracha de pneu estudadas:

- Desvulcanização por micro-ondas

É um processo físico de desvulcanização, onde a recuperação do material ocorre com a ajuda de energia externa. Há o aquecimento da amostra através de ondas eletromagnéticas em uma frequência controlada, promovendo assim a quebra das ligações cruzadas (ligações do tipo enxofre-enxofre e carbono-enxofre) (HIRAYAMA; SARON, 2012; PISTOR et al., 2010; SCURACCHIO; WAKI; BRETAS, 2006).

O tratamento de desvulcanização via micro-ondas provoca mudanças significativas na estrutura do polímero. Quanto maior o tempo de tratamento, maior a quantidade de ligações da cadeia principal do polímero que são quebradas, provocando a degradação do polímero. Em cinco minutos de tratamento, observa-se uma degradação completa das fases elastoméricas, como observado na Figura 12 (SCURACCHIO; WAKI, 2005).

Figura 12 - Curva de DTG para as amostras de borracha sem tratamento e tratadas via microondas.



Fonte: (SILVA; WAKI; SCURACCHIO, 2005).

Com a técnica de recuperação por micro-ondas, a temperatura aumenta rapidamente, fazendo com que o processo de desvulcanização seja muito rápido. O tempo de exposição da amostra varia de acordo com a aplicação do material, porém o processo não resulta em um alto grau de desvulcanização, além de ser observado um ponto de degradação do material (HIRAYAMA; SARON, 2012; NUNES, 2015; ZANCHET, 2014).

- Desvulcanização por ultrassom

O ultrassom é utilizado para processos químicos, na faixa de frequência de 20 kHz a 2 MHz, pois utiliza a energia das ondas sonoras para promover alterações nos materiais. Essa energia provoca tensões de extensão e compressão para o distanciamento definitivo dos átomos presentes nas ligações cruzadas do material vulcanizado (NUNES, 2015; SILVA, 2015).

O processo de desvulcanização é um método simples, rápido, sem a utilização de reagentes químicos e com um alto grau de desvulcanização. O empecilho do método

é o fato da tecnologia dos processos e maquinários serem restritas a alguns países devido a patentes (SILVA, 2015).

- Desvulcanização por processo químico: reagente hidróxido de sódio

Ocorre com o auxílio de reagentes químicos específicos em condições de alta pressão e temperatura. O método gera um elevado grau de desvulcanização, porém essa técnica não é interessante, devido à necessidade de fazer um tratamento prévio dos produtos químicos utilizados antes de descartá-los no meio ambiente (NUNES, 2015).

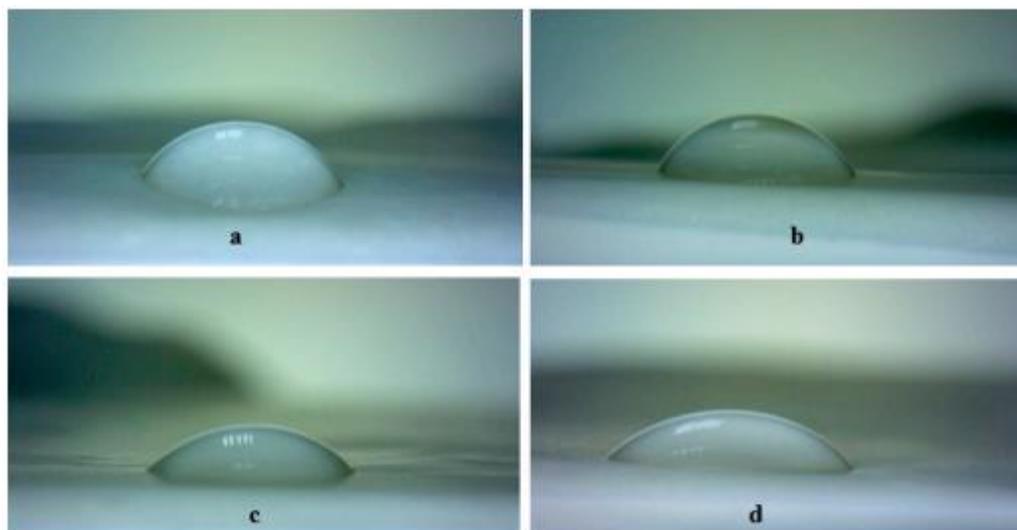
A técnica de tratamento superficial da borracha por solução básica de hidróxido de sódio é muito utilizada por diversos autores, visando a substituição do agregado em misturas de cimento pela borracha (ELCHALAKANI, 2015); (GUO et al., 2017); (PELISSER et al., 2011); (SI; GUO; DAI, 2017) e (YOUSSEF; MILLS; HASSANLI, 2016).

O método apresenta melhora na durabilidade, na energia de fratura e na resistência à flexão (SEGRE; JOEKES, 2000; SI; GUO; DAI, 2017). E em comparação ao concreto emborrachado sem tratamento, percebe-se um aumento na resistência à compressão (CHOU et al., 2007; GUO et al., 2017).

A absorção de água está relacionada à porosidade dos corpos de prova. Nos ensaios realizados pelos autores, as partículas de borracha tratadas com NaOH obtiveram uma menor absorção de água em relação às amostras sem tratamento. Indicando uma menor porosidade, bem como uma melhor adesão dessas partículas na matriz cimentícia após o tratamento da borracha com NaOH (Figura 13 e Figura 14) (SEGRE; JOEKES, 2000; SI; GUO; DAI, 2017).

No estudo realizado por Nuzaimah et al. (2020), os autores compararam o tratamento da borracha com o reagente hidróxido de sódio em diferentes concentrações (1%, 4%, 7% e 10%) e observaram uma melhora na molhabilidade da superfície da borracha com o aumento da concentração do reagente (Figura 13), indicando uma melhor adesão das partículas na matriz cimentícia (Figura 14) (NUZAIMAH et al., 2020).

Figura 13 - Perfis de gotículas de água na superfície de pó de borracha tratadas com NaOH: (a) 1%, (b) 4%, (c) 7% e (d) 10%.



Fonte: (NUZAIMAH et al., 2020).

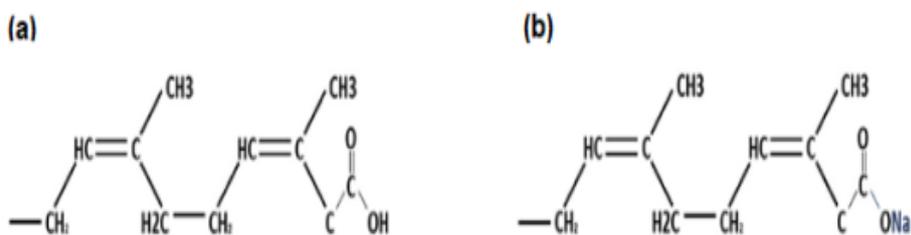
Figura 14 - Micrografia de fratura por tração de compósitos com pó de borracha tratadas com NaOH a 7%.



Fonte: (NUZAIMAH et al., 2020).

O aperfeiçoamento que ocorre nas partículas de borracha tratadas com solução de NaOH pode ser explicado pela substituição da hidroxila (OH^-), encontrada no grupo ácido carboxílico, pelo íon (Na^+), conforme mostrado na Figura 15. Essa substituição, modifica a estrutura principal da borracha, o cis-poliisopreno, provocando uma melhora no potencial da partícula atrair água, e conseqüentemente, a hidratação do cimento (CHOU et al., 2007; GUO et al., 2017; PICOLI; VERISSIMO; PADILHA, 2020).

Figura 15 - Mecanismos para os métodos de tratamento de superfície com solução de NaOH



Legenda: (a) A estrutura de cis-poliisopreno com grupo de ácido carboxílico; (b) A estrutura do produto da reação da solução de NaOH com cis-poliisopreno com grupo ácido carboxílico. Fonte: (GUO et al., 2017).

Com o tratamento superficial da borracha com solução de hidróxido de sódio, observou-se que esse material em misturas à base de cimento, pode ser utilizado na construção civil como pisos e revestimentos, devido às propriedades mecânicas adquiridas (MENEGUINI, 2011; SI; GUO; DAI, 2017).

- Desvulcanização termomecânica

A tensão de cisalhamento realizada sobre a borracha vulcanizada pode promover a ruptura seletiva das ligações cruzadas presentes na borracha, devido à força e a direção dessa tensão aplicada sobre o material. Pode acontecer da tensão de cisalhamento aplicada ser maior que a força das ligações químicas cruzadas (ligações do tipo enxofre-enxofre e carbono-enxofre), ocorrendo assim a degradação da cadeia principal do polímero (NUNES, 2015).

- Desvulcanização biológica

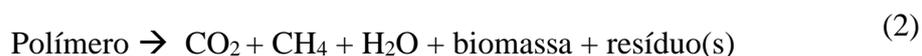
O processo de desvulcanização biológico envolve microrganismos que podem romper, seletivamente, as ligações de enxofre, como o *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus peramatobolis* ou *Pyrococcus furiosus*. O método quebra as ligações cruzadas da borracha vulcanizada por biotratamento com bactérias. Apesar da técnica não degradar a cadeia principal do polímero, há dificuldades na utilização dessa técnica devido ao alto custo e a difícil implementação, principalmente em virtude da intoxicação dos microrganismos com os aditivos da borracha (ABOELKHEIR et al., 2019; FIGUEIREDO, 2014).

Os polímeros naturais e sintéticos são formados por tipos de poliisopropeno, que podem ser biodegradados com a ação dos microrganismos, como bactérias e fungos (GU, 2003). Vários estudos vêm sendo feitos sobre o metabolismo de microrganismos aeróbicos e anaeróbicos quando estes fazem a desvulcanização da borracha. A diferença entre o processo de biodegradação aeróbico e anaeróbico, é observado nas Equações (1) e (2) (ABOELKHEIR, 2019; LEJA; LEWANDOWICZ, 2009):

Biodegradação aeróbica:



Biodegradação anaeróbica:

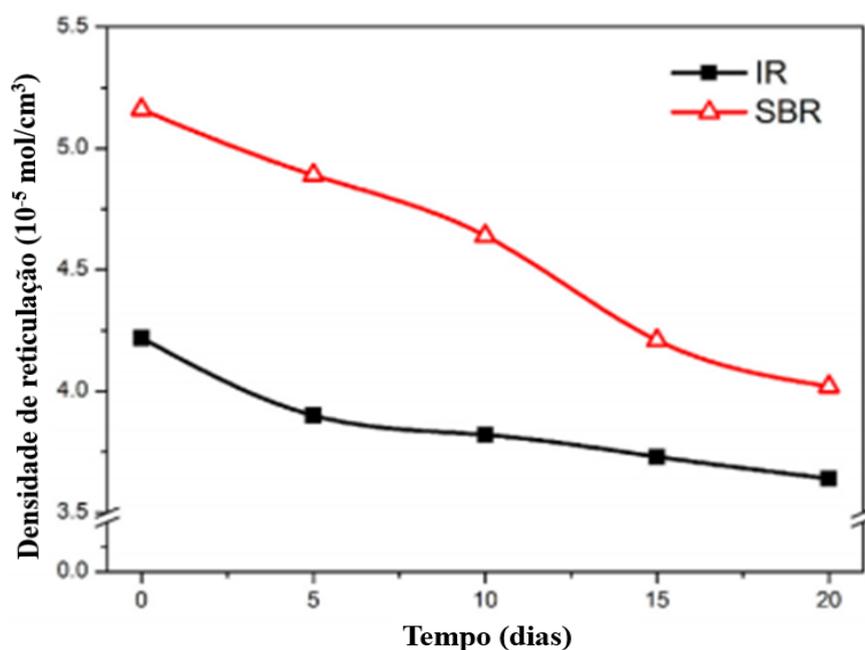


No processo de biodegradação aeróbia, existe a presença de oxigênio e é produzido o dióxido de carbono. Já no processo de biodegradação anaeróbia, não há presença de oxigênio, e o metano é produzido (LEJA; LEWANDOWICZ, 2009).

O tratamento biológico em borrachas vulcanizadas altera a densidade de reticulação, morfologia e grupo funcional da borracha após biodegradação (ABOELKHEIR, 2019). A Figura 16 mostra o efeito do tratamento biológico na

densidade de reticulação das borrachas v-IR e v-SBR. Em ambas as amostras de borracha observa-se que a densidade de reticulação diminuiu com o aumento do tempo de tratamento (HU et al., 2016).

Figura 16 - Densidades de reticulação de v-IR e v-SBR com diferentes tempos de tratamento



Fonte: (HU et al., 2016).

As técnicas acima descritas foram desenvolvidas para a desvulcanização da borracha, porém apresentam alguns problemas, como o baixo grau de desvulcanização, impactos ambientais, degradação térmica da borracha, custos e tempo de processo elevado; fazendo com que essas técnicas não sejam economicamente ou ecologicamente corretas.

- Desvulcanização por radiação ultravioleta

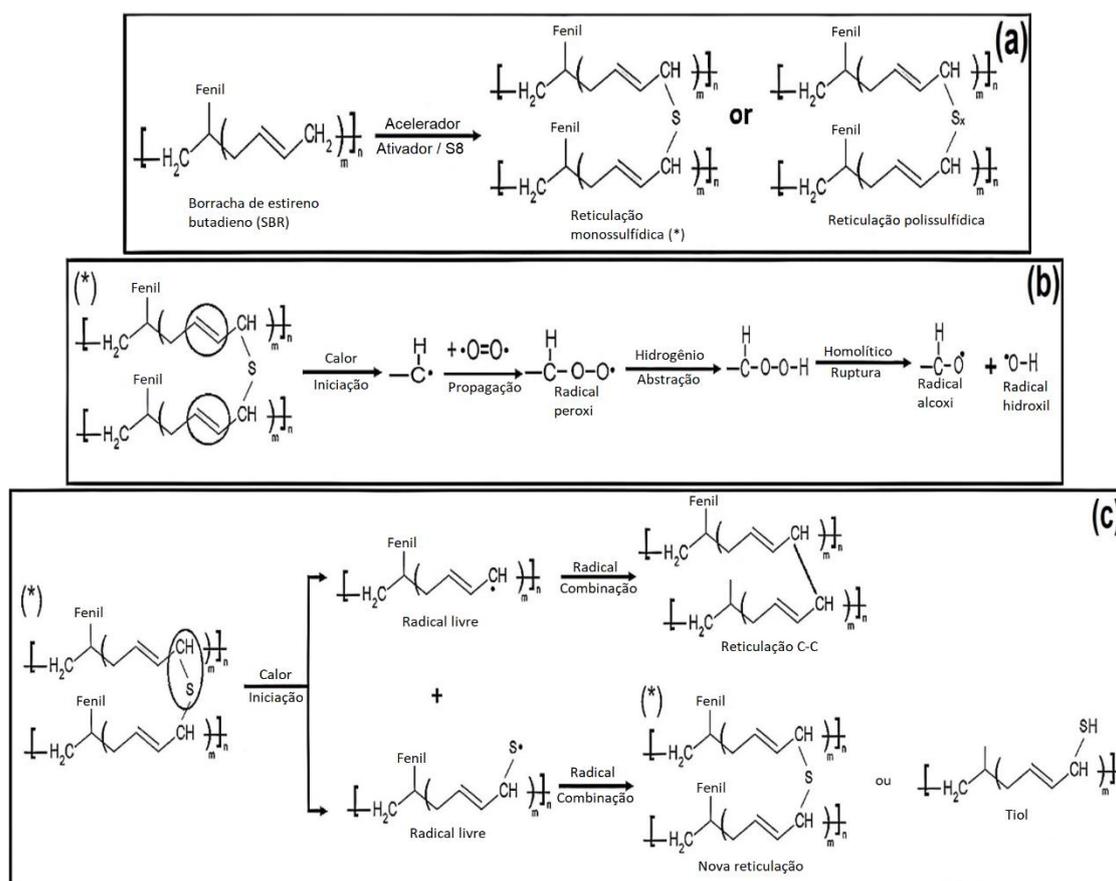
A radiação ultravioleta vem sendo muito utilizada para pré-tratamento de amostras, ou seja, as amostras passam por certos tipos de processos, sofrendo assim alterações, para depois serem determinadas e quantificadas (GOUVÊA et al., 2014).

Esse procedimento é considerado simples e limpo, devido sua capacidade de promover a quebra de ligações químicas e derivados fotoquímicos, sem a necessidade

de uso de reagentes ou solventes químicos, evitando assim problemas ambientais devido à presença de resíduos tóxicos, e respeitando os princípios da Química Verde (GOUVÊA et al., 2014). Aboelkheir et al., 2021 comparou alguns métodos de recuperação da borracha (micro-ondas, bactéria, larvas e ultravioleta) em relação à duração do método, ao custo e viabilidade ambiental. Os resultados mostraram que o método de irradiação ultravioleta é o mais adequado para o tratamento (ABOELKHEIR et al., 2021a).

O mecanismo de desvulcanização termo-oxidativa ocorre com um aquecimento que resulta na formação de um radical livre de carbono, e junto com o oxigênio presente na atmosfera, há a formação de um radical alcóxi ou hidroxila. Existe a possibilidade de ocorrer uma degradação, ou seja, a quebra das ligações C=C (Figura 17b); a desvulcanização, quebra das ligações C-S (Figura 17c), formando um radical enxofre; ou a combinação desses radicais pode gerar uma reticulação C-C ou C-S (revulcanização), como observado na Figura 17c (ABOELKHEIR et al., 2021b).

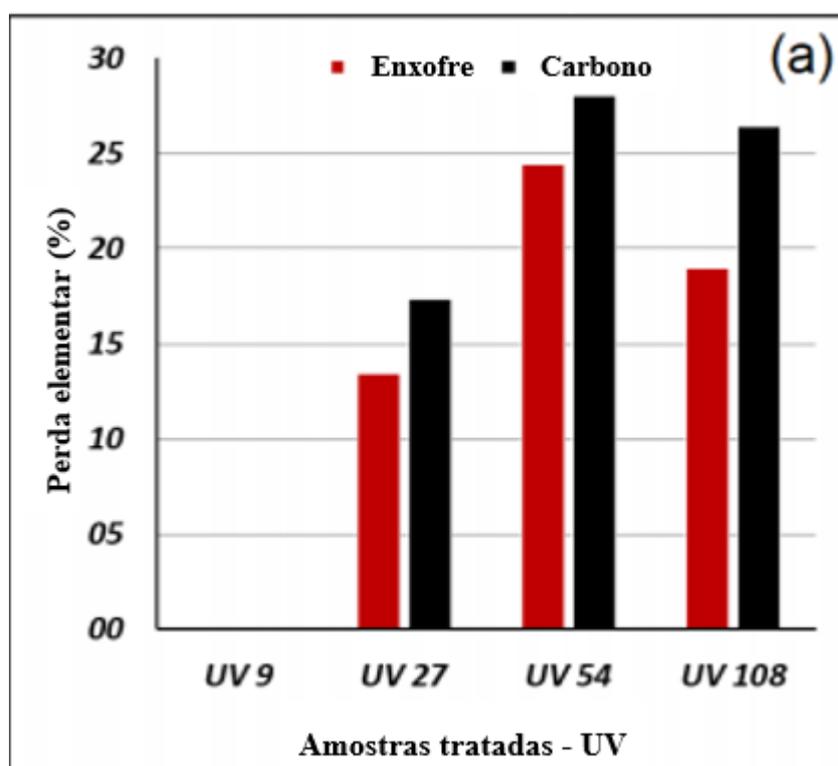
Figura 17 – Mecanismo de: a) vulcanização do SBR; b) degradação termo-oxidativa do SBR e c) desvulcanização do SBR



Fonte: (ABOELKHEIR et al., 2021b).

A utilização de radiação ultravioleta em borrachas vulcanizadas mostrou-se eficaz na quebra das ligações cruzadas entre C-C e C-S, criando ligações do tipo C-O, C=O e COO⁻, promovendo assim uma melhora na molhabilidade e na adesão mecânica da amostra. Ao mesmo tempo, essa espécie de tratamento é considerada ecologicamente correta por não agredir o meio ambiente (ABOELKHEIR et al., 2021b; ROMERO-SÁNCHEZ; PASTOR-BLAS; MARTÍN-MARTÍNEZ, 2005). O aumento do tempo de exposição da amostra de borracha na radiação UV apresenta um maior decaimento nas massas de carbono e enxofre, evidenciando o efeito da desvulcanização (Figura 18) (ABOELKHEIR et al., 2021b; ROMERO-SÁNCHEZ; PASTOR-BLAS; MARTÍN-MARTÍNEZ, 2005).

Figura 18 - Perda de massa total de carbono e enxofre nas amostras v-SBR via tratamento UV



Fonte: (ABOELKHEIR, 2019).

A borracha desvulcanizada por tratamento via radiação ultravioleta apresenta uma maior polaridade e flexibilidade em comparação a borracha vulcanizada, sendo possível a utilização desse novo material em matrizes poliméricas ou cerâmicas como agregado (ABOELKHEIR et al., 2021a).

2.11 Concreto Emborrachado

O chamado concreto ecológico é produzido a partir de resíduos oriundos de materiais descartados nas indústrias. É uma forma de reaproveitar esses resíduos e também, de buscar opções mais acessíveis para a produção do concreto (RABELO, 2017).

A utilização de asfalto-borracha foi feita no Brasil pela primeira vez em 2001, no Rio Grande do Sul (POURRE, 2016). Devido às propriedades químicas do pneu, esse tipo de asfalto pode apresentar maior resistência a deformações, além do ganho ambiental. A presença da borracha no concreto, faz com que ele apresente mudanças em suas propriedades, como possuir uma maior durabilidade e ser mais elástico (ROMUALDO et al., 2011).

O reaproveitamento da borracha de pneu inservível como agregado no concreto, é de extrema importância no quesito ambiental, pois com a utilização da borracha como agregado, há uma substituição parcial de areia e brita na produção do concreto, acarretando em uma menor extração dos recursos naturais, areia e brita. Além de ajudar a diminuir os problemas com o descarte indevido de pneus inservíveis (ROMUALDO et al., 2011).

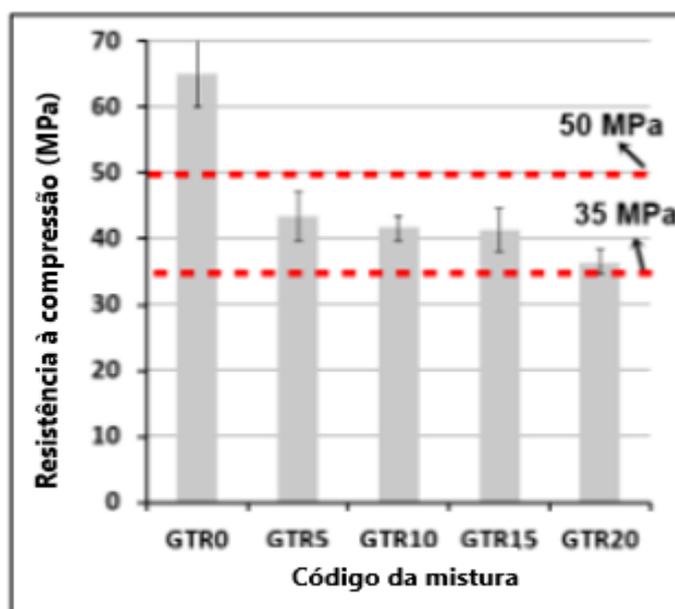
A desvulcanização da borracha de pneu é estudada na aplicação em misturas à base de cimento, pois trata-se de um polímero apolar (cadeias longas de hidrocarbonetos) e inflexível (ligações cruzadas advindas da vulcanização), o que dificulta sua adesão na pasta de cimento. Portanto, essa técnica é utilizada para que a borracha após o tratamento adquira uma polaridade e uma flexibilidade, facilitando sua adesão na pasta de cimento (ABOELKHEIR, 2019).

O estudo da borracha de pneu desvulcanizada como agregado em concreto, mostrou a viabilidade da utilização da borracha desvulcanizada em certas aplicações na engenharia, combinando as propriedades desta borracha com a matriz específica do cimento (ABOELKHEIR, 2019; SILVA et al., 2019).

A borracha de pneu, Ground Tire Rubber (GTR), tratada quando adicionada ao cimento provoca uma diminuição na resistência à compressão do concreto, como pode ser observado na Figura 19. Em contrapartida, há um aumento significativo na

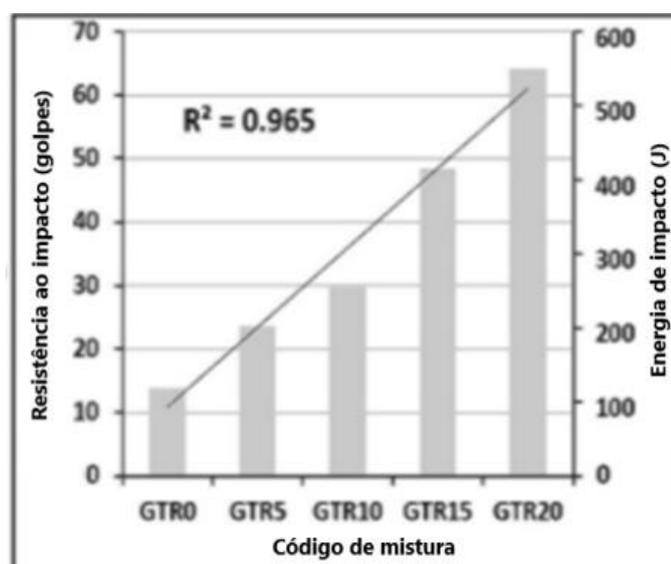
resistência ao impacto (Figura 20), pode -se notar a forte correlação entre a borracha e a resistência ao impacto, pelo ajuste linear com um alto coeficiente ($R^2 = 0,965$). Com isso, o concreto emborrachado possui um grande potencial para aplicações sujeitas a impactos, como pavimentos e cargas dinâmicas (ABOELKHEIR et al., 2021c).

Figura 19 - Influência da borracha (GTR) na resistência à compressão do concreto



Fonte: (ABOELKHEIR et al., 2021c).

Figura 20 - Influência da borracha (GTR) na resistência ao impacto



Fonte: (ABOELKHEIR et al., 2021c).

Assim, a mistura entre a borracha de pneu moída e a pasta de cimento promove um material com propriedades diferentes do original, sendo relevantes para

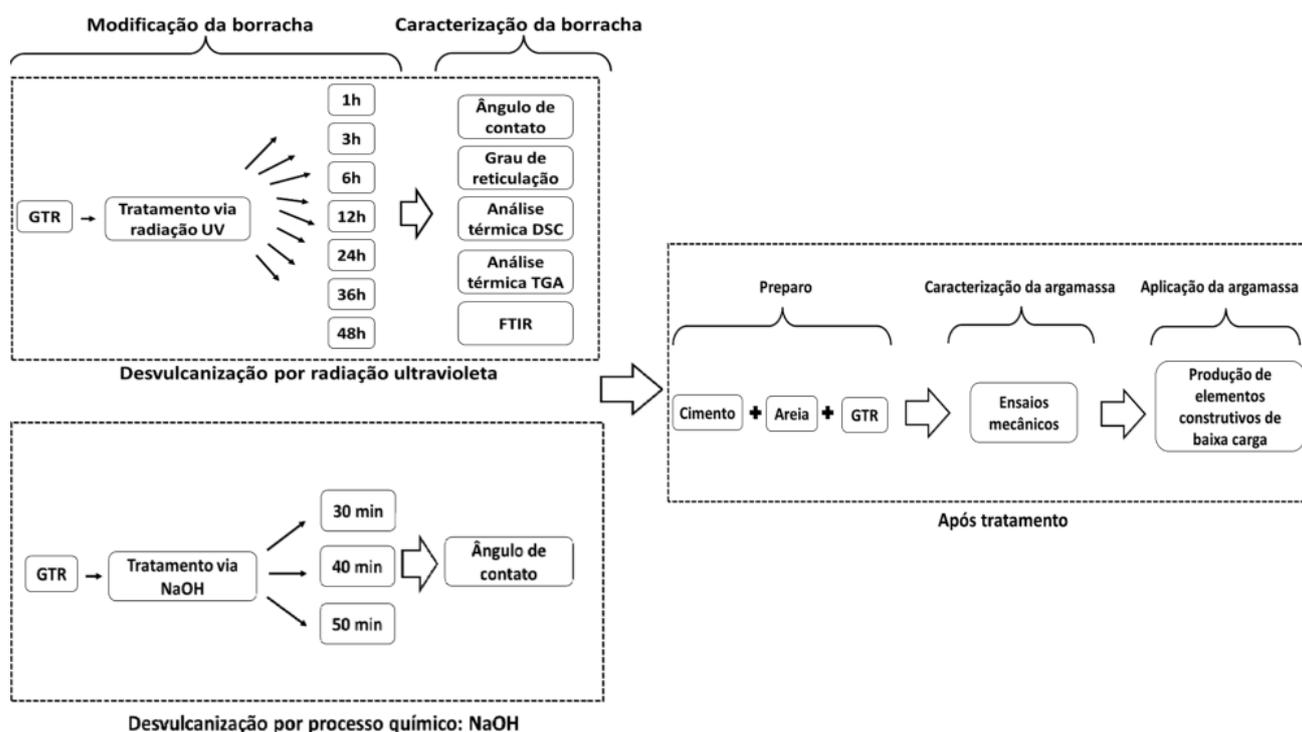
determinadas aplicações, como pavimentações; por apresentar baixa resistência à compressão e alta resistência à abrasão, à flexão e ao impacto (ABOELKHEIR, 2019; FREITAS et al., 2009; SEGRE; JOEKES, 2000).

A reutilização da borracha de pneu na construção civil é estudada para amenizar os impactos tanto da borracha de pneu como da construção civil, no meio ambiente. Os ganhos referentes à reutilização da borracha serão discutidos na continuação da dissertação.

3 Materiais e Métodos

A Figura 21 mostra o fluxograma de toda a parte experimental que foi realizada durante esta pesquisa. Como pode ser observado, em um primeiro momento executou-se a desvulcanização da borracha de pneu por dois métodos distintos para fins comparativos: radiação ultravioleta e processo químico. E após os tratamentos realizou-se o preparo das argamassas para caracterização.

Figura 21 - Fluxograma referente a parte experimental realizada



Fonte: Autor, 2021.

Na seção a seguir são listados os equipamentos, procedimentos e materiais utilizados no desenvolvimento da parte experimental deste projeto.

3.1 Materiais

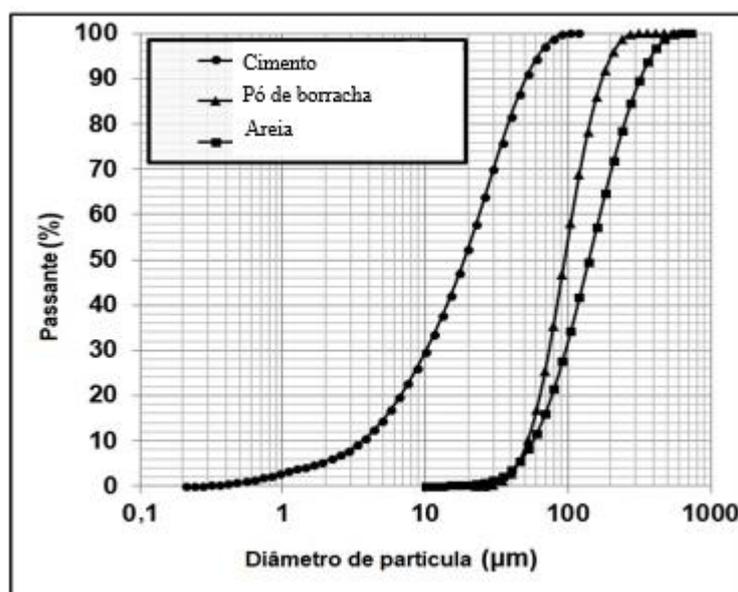
Os materiais utilizados para a produção das matrizes foram: cimento Portland CPV, areia natural como agregado fino, e borracha do pneu de tamanho de partícula de 120 μm (Genan- Dinamarca) para substituição da areia como agregado fino, além do uso de água deionizada e agente superplastificante. Para o tratamento da borracha via processo químico foi utilizado o reagente hidróxido de sódio a 10% em volume. A

Figura 22 mostra as curvas granulométricas dos materiais secos e a composição química dos mesmos é mostrada na Tabela 1. A massa específica da areia é de $2,667 \text{ g/cm}^3$, da borracha do pneu de $120 \mu\text{m}$ é de $1,18 \text{ g/cm}^3$, e do cimento Portland CPV é de $3,14 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 1 - Composição química dos materiais secos

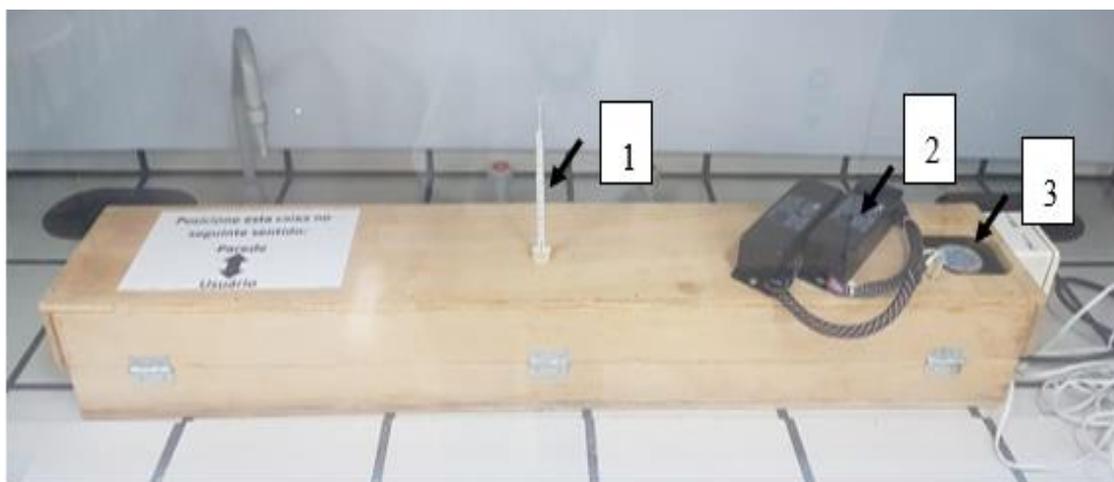
Cimento Portland CPV							
Substância	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SrO
Quantidade (%)	70,45	14,63	4,90	4,21	3,84	1,05	0,44
Agregado fino (Areia)							
Substância	SiO ₂	SO ₃	TiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	ZnO
Quantidade (%)	94.83	2.13	1.48	0.96	0.38	0.15	0.03
Pó de borracha de pneu							
Substância	SO ₃	ZnO	SiO ₂	CaO	Br	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃
Quantidade (%)	35.94	33.51	20.98	3.04	1.67	1.66	1.57

Figura 22 - Curva de distribuição granulométrica dos materiais secos



A Figura 23 representa a câmara UV utilizada para a desvulcanização da borracha de pneu. O sistema é composto por um reator eletrônico para lâmpada fluorescente de modelo PL – 1x75 UV, uma lâmpada ultravioleta GERMICIDA 25W - GPH846T5VH / HO / 4PSE de 185 nm, um cooler axial fan modelo 80 x 80 x 38 mm, e um termômetro de mercúrio para o controle da temperatura.

Figura 23 - Câmara de irradiação UV.



Legenda: 1 – Termômetro de mercúrio -10 °C à 110 °C; 2 - reator eletrônico para lâmpada fluorescente de modelo PL – 1 x 75 UV; 3 - cooler axial fan modelo 80 x 80 x 38 mm. Fonte: Autor, 2021.

3.2 Métodos

Esta seção está dividida em quatro partes: modificação da borracha, via radiação ultravioleta e hidróxido de sódio, caracterização da borracha após tratamento, preparo da argamassa e caracterização da argamassa.

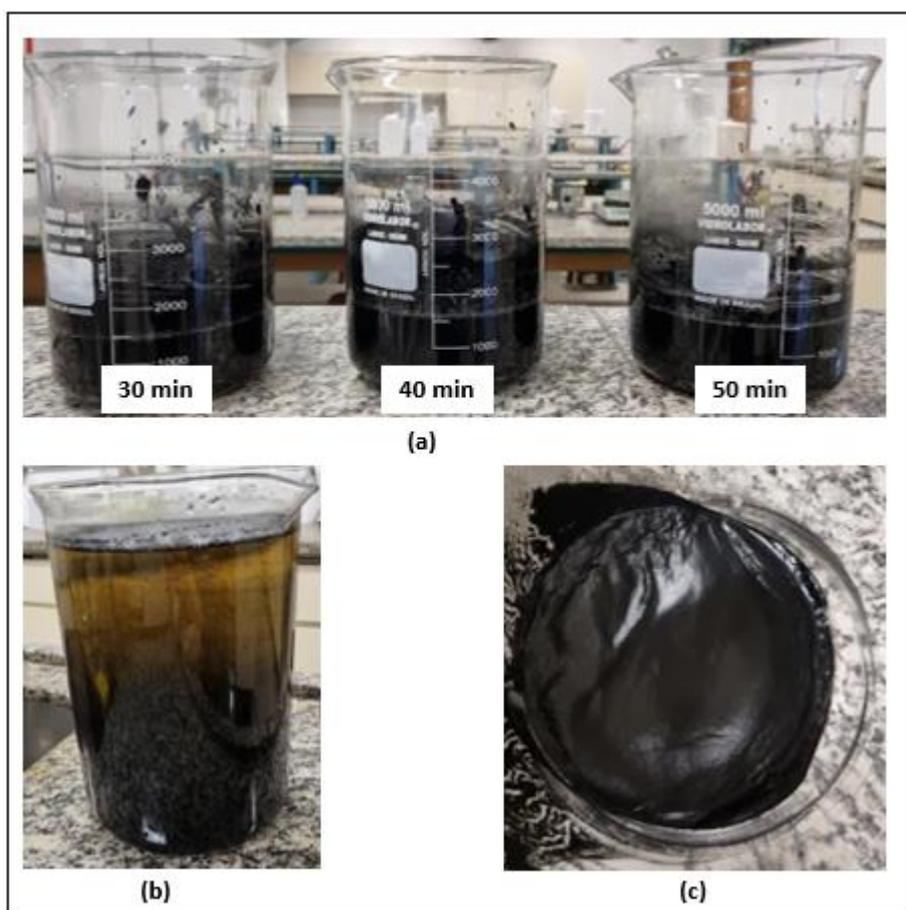
3.2.1 Modificação da borracha

O tratamento da borracha foi realizado por dois métodos distintos, radiação ultravioleta e processo químico via hidróxido de sódio, para comparar a eficiência de cada técnica na modificação das amostras de borracha e na mudança das propriedades dos compósitos resultantes (Figura 21).

3.2.1.1 Tratamento via hidróxido de sódio

Para o tratamento via NaOH foram levadas em consideração duas metodologias (NUZAIMAH et al., 2020; YOUSSEF et al., 2014) que diferem no tempo de submersão das amostras no hidróxido de sódio, portanto para definir o melhor tempo de tratamento foram realizados ensaios em três períodos distintos: 30 min, 40 min e 50 min de imersão da amostra de borracha em solução de NaOH a 10% (Figura 24a). Após esse período, as amostras foram lavadas em água até o pH neutro (pH = 7) garantindo a ausência da solução de hidróxido de sódio, a fim de evitar qualquer impacto na durabilidade do concreto (Figura 24b). E por fim, as amostras foram dispostas em estufa a 60°C durante 24h para secagem (Figura 24c).

Figura 24 - Tratamento das amostras via processo químico (a) imersão em NaOH; (b) lavagem em água; (c) amostra encaminhada a estufa.



Fonte: Autor, 2021.

3.2.1.2 Exposição de irradiação ultravioleta

Cerca de 5 g de borracha de pneu vulcanizada (Genan-Dinamarca) foram espalhadas na câmara de irradiação ultravioleta formando uma camada fina e uniforme de borracha, a fim de que a irradiação propague-se por toda a amostra (Figura 25). Para definir o melhor tempo de tratamento das amostras foram realizados ensaios em períodos diferentes: 1 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h, 36 h e 48 h de exposição à irradiação UV com 25W de potência. Uma outra amostra de borracha foi fervida em água a 100 °C por 20 minutos, para fim de comparação com a exposição à irradiação ultravioleta.

Figura 25 - Amostra de borracha antes de ser desvulcanizada na câmara UV.



Legenda: 1 – Lâmpada ultravioleta GERMICIDA 25W - GPH846T5VH / HO / 4PSE de 185 nm;
2 - Borracha do pneu de tamanho de partícula de 120 μm (Genan- Dinamarca). Fonte: Autor, 2021.

3.2.2 Caracterização da borracha de pneu via irradiação ultravioleta

A seguir são apresentados os ensaios realizados para a caracterização da borracha de pneu tratada via irradiação ultravioleta.

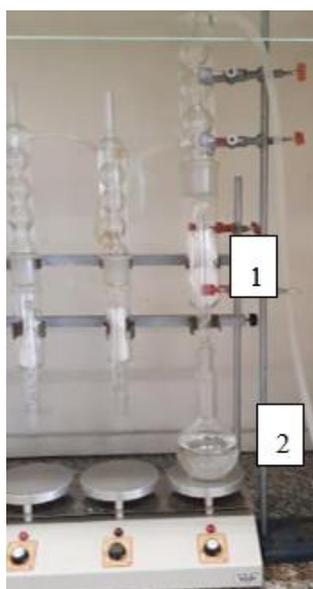
3.2.2.1 Grau de reticulação

O ensaio de reticulação foi realizado para analisar o comportamento das amostras de borracha em relação ao tempo de exposição à irradiação UV. Esse

experimento verifica a reticulação das amostras, ou seja, a rede tridimensional com ligações cruzadas. Quanto maior o grau de reticulação, mais ligações cruzadas estão presentes no material.

Cerca de 30 mg de cada amostra de borracha de pneu tratada foram colocadas em papel de filtro bem fechado e submetidas a um sistema de lixiviação por 48 h à temperatura de ebulição do solvente tolueno, sendo que o processo foi feito em duplicata, conforme mostra a Figura 26.

Figura 26 - Esquema da montagem do sistema de lixiviação



Legenda: 1- Amostras; 2 – Solvente tolueno. Fonte: Autor, 2020.

O grau de reticulação foi calculado como a razão entre o peso da amostra antes e depois da amostra ser imersa em tolueno durante a lixiviação, como mostrado nas equações (3) e (4).

$$Lfp\% = \left(1 - \frac{Ba}{Bb}\right) \times 100 \quad (3)$$

$$CD\% = \frac{Wt - \{Wb - (Wb \times Lfp\%)\}}{Ws} \times 100 \quad (4)$$

Onde L_{fp} é a perda de peso do papel de filtro devido ao contato com o solvente (mg), B_a é o peso do papel de filtro em branco após o ensaio (mg), B_b é o peso do papel de filtro branco inicial (mg). CD é o grau de reticulação (%), W_t é o peso total real da amostra após o ensaio (mg), W_b é o peso da amostra e do papel de filtro inicial, e W_s é o peso da amostra (mg).

3.2.2.2 Ângulo de contato

O experimento de ângulo de contato foi realizado para avaliar a molhabilidade das amostras de borracha em relação ao tempo de exposição à irradiação UV. O ensaio verifica o ângulo de uma gota d'água em uma determinada superfície. E a partir dessa resposta, é possível analisar a polaridade da superfície estudada, ou seja, a molhabilidade da amostra.

O ângulo de contato foi medido através do equipamento analisador de forma de gota Krüss modelo DSA 100 (Figura 27). As amostras foram espalhadas em uma superfície de vidro formando uma camada fina e uniforme de borracha simulando uma superfície sólida (Figura 28). Para o ensaio foi utilizada água destilada e as análises foram feitas em triplicata.

Figura 27 - Analizador de forma de gota Krüss modelo DSA 100

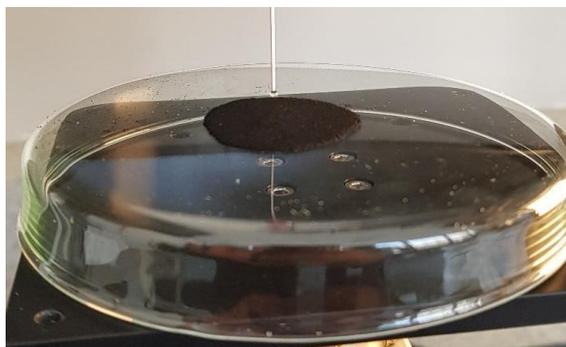


Fonte: Autor, 2020.

A água deionizada foi utilizada como solvente neste procedimento por ser uma substância polar conhecida. Quanto maior o ângulo da gota d'água em relação a

superfície, maior a diferença de polaridade entre elas, ou seja, a superfície possui baixa polaridade (material hidrofóbico).

Figura 28 - Amostras compactadas



Fonte: Autor, 2020.

3.2.2.3 Análise Térmica – (TGA/DTG/DSC)

As análises termogravimétricas e calorimetria exploratória diferencial foram realizadas em um equipamento Perkin Elmer STA 6000. As derivadas das curvas TGA (DTG) foram criadas e em seguida foram suavizadas usando o software Qtiplot. Uma taxa de aquecimento de 20 °C/min de 25 a 600 °C e atmosfera de nitrogênio com uma vazão de gás de 20 mL/min foram utilizadas. As análises foram feitas em duplicata.

3.2.2.4 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de infravermelho foram obtidos através do equipamento de modelo Varian Espectrofotômetro 3100 FTIR Excalibur Series (Japão). As amostras de borracha de pneu tratadas foram maceradas com brometo de potássio KBr em uma pastilha, onde 1 mg de cada amostra foi pesado e misturado com 300 mg de KBr. Posteriormente, o espectro FTIR da amostra foi registrado à temperatura ambiente e uma resolução de 4 cm⁻¹, 64 varreduras acumuladas e um intervalo de 4000 a 400 cm⁻¹, aplicando o modo de transmitância. A quantificação das bandas foi realizada através do cálculo da diferença de área entre cada grupo de bandas semelhantes. O processo foi realizado em duplicata.

3.2.3 Dosagem, Preparo e Cura

A proporção da mistura utilizada na argamassa foi, cimento: agregado fino: água = 1: 3: 0,52 com água e superplastificante constantes em relação ao cimento (0,52 e

0,015) respectivamente, enquanto o agregado fino varia conforme a substituição da areia pelo GTR. Em um primeiro momento foi feita a mistura dos materiais secos (cimento, areia e/ou GTR) por 1 minuto, depois estes foram adicionados lentamente a mistura de materiais úmidos (água e superplastificante), e todos os componentes foram misturados por 1,5 minutos. Após repouso de 1,5 minutos, os componentes foram misturados por mais 1,5 minutos. Após a moldagem, foi feita a desmoldagem dos corpos de prova dois dias depois e foram curados por imersão em água durante uma semana e por fim, manteve-se curando ao ar até completarem 28 dias e ensaiados. Para cada argamassa, foram produzidos 3 corpos de prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm (largura x altura x comprimento), segundo os procedimentos da norma NBR 16738 (NBR 16738, 2019) (Figura 29).

A Tabela 2 apresenta as proporções das misturas de argamassa utilizadas.

Tabela 2 - Proporção das misturas de argamassa

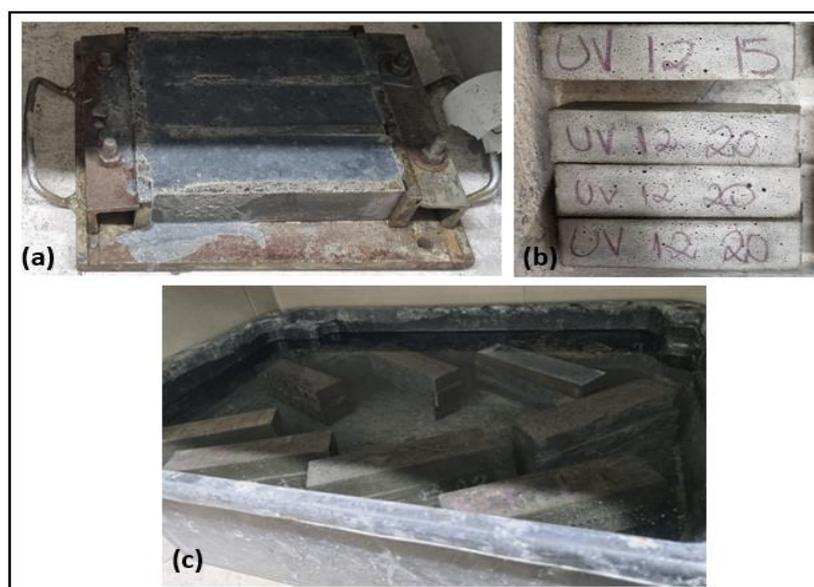
Código da mistura	Substituição (%)	A/C	Proporção da mistura (kg/m ³)				
			Cimento	Agregado fino	Borracha	Água	SP
Ref - sem	0	0,52	506,4	1519,3	0	249,7	22,3
Ref - B5	5			1443,3	33,5		
Ref - B10	10			1367,3	67,1		
Ref - B15	15			1291,4	100,6		
Ref - B20	20			1215,4	134,2		
NaOH30 - 5	5			1443,3	33,5		
NaOH30 - 10	10			1367,3	67,1		
NaOH30 - 15	15			1291,4	100,6		
NaOH30 - 20	20			1215,4	134,2		
NaOH40 - 5	5			1443,3	33,5		
NaOH40 - 10	10			1367,3	67,1		
NaOH40 - 15	15			1291,4	100,6		
NaOH40 - 20	20			1215,4	134,2		
NaOH50 - 5	5			1443,3	33,5		
NaOH50 - 10	10			1367,3	67,1		
NaOH50 - 15	15			1291,4	100,6		
NaOH50 - 20	20			1215,4	134,2		
UV12 - 5	5			1443,3	33,5		
UV12 - 10	10			1367,3	67,1		
UV12 - 15	15			1291,4	100,6		
UV12 - 20	20	1215,4	134,2				

Substituição (%): Taxa de substituição do agregado fino (areia) por borracha de pneu

A/C: Relação água/cimento

SP: Superplastificante

Figura 29 – Esquema do procedimento de: moldagem das amostras (a), desmoldagem das amostras (b) e cura em imersão em água (c)



Fonte: Autor, 2021.

3.2.4 Propriedades Mecânicas

Nessa seção serão apresentados os ensaios mecânicos que foram realizados em todo o conjunto de amostras.

Módulo de elasticidade dinâmico:

O ensaio de Módulo de elasticidade dinâmico foi realizado com 3 corpos de prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm, na idade de 28 dias conforme a NBR 15630 (2008) (NBR 15630, 2008).

A velocidade de propagação de ondas é calculada através da seguinte equação:

$$V = \frac{L}{t} \quad (5)$$

onde:

V é a velocidade de propagação da onda ultrasônica, expressa em milímetros por micros segundos (mm/ μ s);

L é a distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores (comprimento do corpo-de-prova) (mm);

t é o tempo registrado pelo mostrador digital (μ s).

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser calculado conforme a seguinte equação:

$$E_d = V^2 \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \quad (6)$$

onde:

E_d é o módulo de elasticidade dinâmico, expresso em megapascal (MPa);

v é a velocidade de propagação da onda ultrasônica, expressa em milímetros por micro segundos (mm/ μ s);

ρ é a densidade de massa aparente do corpo-de-prova, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

μ é o coeficiente de Poisson. Adota-se nesta equação o valor 0,2.

Resistência à tração na flexão:

O ensaio de resistência à flexão foi realizado com 3 corpos de prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm, na idade de 28 dias. Foi utilizada uma prensa Kratos com capacidade de 20 tf. A velocidade de aplicação de carga foi igual a 50 N/s, seguindo as recomendações da NBR 16738 (NBR 16738, 2019).

Resistência à compressão:

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com 3 corpos de prova de 40 mm x 40 mm x 40 mm, na idade de 28 dias. Foi utilizada a mesma prensa empregada para o ensaio de flexão. A velocidade de aplicação de carga foi igual a 720 N/s (NBR 16738, 2019)

A Figura 21 mostra o procedimento de caracterização e aplicação da argamassa para um melhor entendimento. A partir da caracterização da argamassa modificada é possível estabelecer aplicações viáveis para a mesma na construção civil.

4 Resultados e Discussões

Seção A:

Encontram-se a seguir os resultados referentes ao tratamento prévio da borracha de pneu via irradiação ultravioleta (Figura 30) e da argamassa obtida. Em seguida, estes serão analisados comparativamente para definir a melhor condição de processo.

Figura 30 - Amostras de borracha de pneu após tratamento via irradiação UV.



Legenda: 1 – Amostra de referência; 2 – 1 hora de exposição à irradiação UV; 3 – 3 horas de exposição; 4 – 6 horas de exposição; 5 – 12 horas de exposição; 6 – 24 horas de exposição; 7 – 36 horas de exposição; 8 – 48 horas de exposição. Fonte: Autor, 2021.

4.1 Ângulo de contato

A Figura 31 mostra gotas d'água na superfície da borracha sem tratamento, apresentando um elevado ângulo de contato, sendo classificado assim como um material hidrofóbico.

Figura 31 - Gotas d'água em superfície GTR sem tratamento



Fonte: Autor, 2020.

Exposição à irradiação ultravioleta:

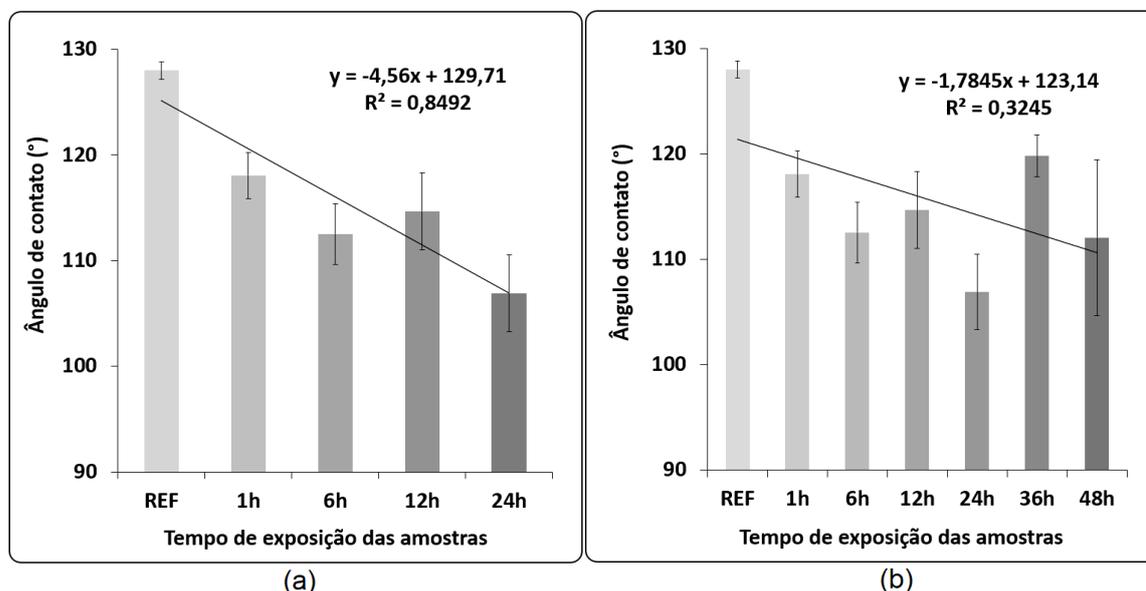
A Figura 32 apresenta o gráfico do ângulo de contato, usando água como solvente, para diferentes tempos de exposição da borracha via tratamento UV, comparados com a borracha de pneu sem tratamento (referência).

É possível observar um decaimento do ângulo de contato de acordo com o aumento no tempo de tratamento, indicando uma maior afinidade com a água e uma melhoria na molhabilidade das amostras de borracha após a irradiação UV (Figura 32a).

Uma modelagem de regressão linear foi aplicada, onde o coeficiente de correlação correspondente (R^2) registrou 0,8492. Isso pode referir-se à atividade de degradação da irradiação UV, possibilitando que a superfície da borracha seja mais hidrofílica, como a polaridade tende a aumentar após a possível oxidação da superfície degradada (Figura 32a). E a representatividade dos dados foi verificada a partir da técnica estatística ANOVA; o valor retornado foi menor que 0,05, o que demonstra que os dados são significativamente diferentes.

A Figura 32b mostra o gráfico dos ângulos de contato para todos os tempos de exposição da borracha via tratamento UV estudados (1 h, 6 h, 12 h, 24 h, 36 h e 48 h), comparando com a borracha de pneu sem tratamento (referência).

Figura 32 - Mudança no ângulo de contato da borracha de pneu após diferentes tempos de exposição à irradiação UV: (a) até 24 h e (b) até 48 h.



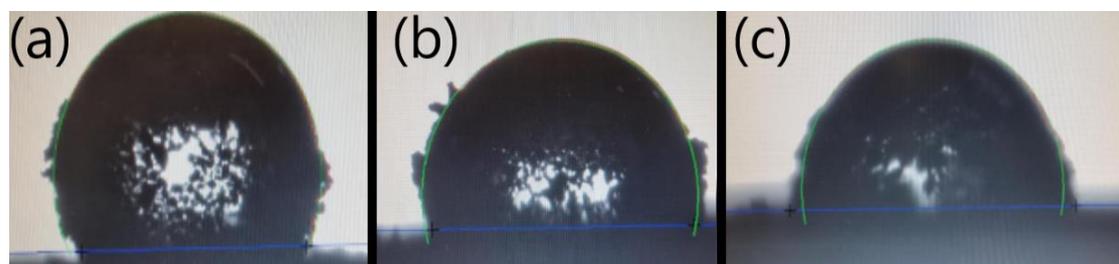
Observa-se um aumento no ângulo de contato das amostras 36 h e 48 h, demonstrando que a afinidade com a água das amostras com tempo superior a 24 h, diminuiu. Essa diminuição de polaridade pode ser explicada pela revulcanização da borracha, onde são criadas ligações C-C e C-S, formando uma nova rede tridimensional, acarretando em uma diminuição da polaridade da borracha, como mostrado no mecanismo da Figura 17c.

Nota-se a existência de um tempo máximo de exposição da borracha ao tratamento. O melhor tempo de exposição à irradiação UV foi de 24 h, onde houve maior afinidade da amostra com a água, enquanto nos tempos superiores a 24 h, observa-se a diminuição dessa afinidade que pode referir-se à regeneração da borracha.

Tratamento com NaOH:

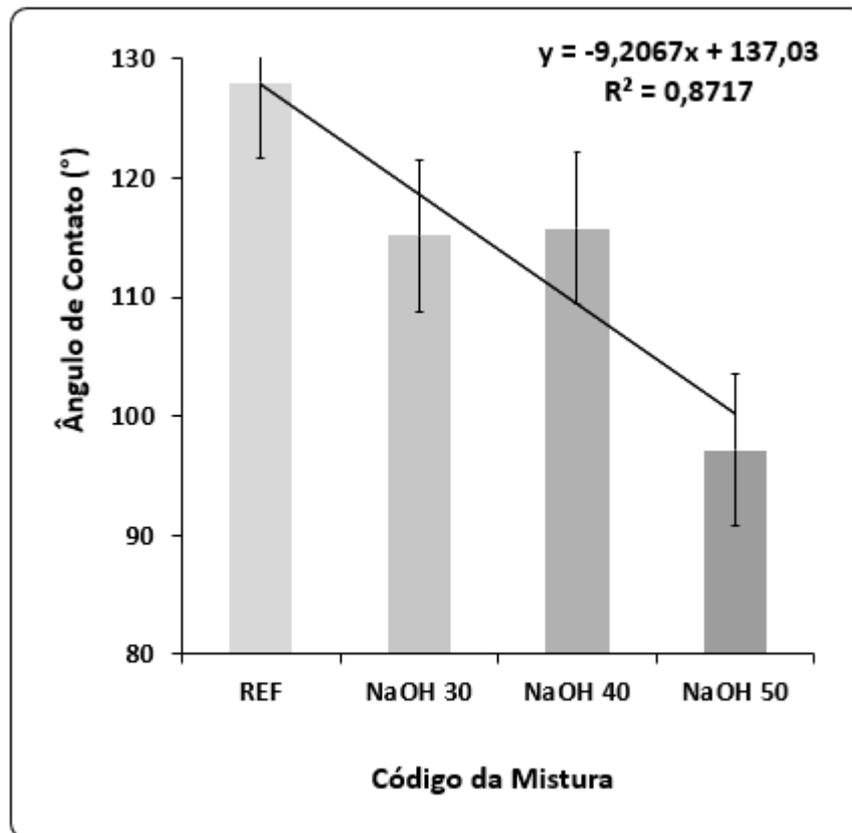
A Figura 33 faz um comparativo entre as gotas formadas na superfície da borracha após tratamento com NaOH por 30 min, 40 min e por 50 min, respectivamente (Figura 33a e Figura 33b). Como pode ser observado, o ângulo de contato diminuiu com o aumento do tempo de tratamento com NaOH, indicando um aumento na afinidade da amostra com a água.

Figura 33 - Comparação entre o formato da gota após tratamento com NaOH: (a) 30 min e (b) 40 min e (c) 50 min.



A Figura 34 mostra o gráfico dos ângulos de contato para os tempos de estudos de tratamento com NaOH (30 min, 40 min e 50 min), comparando com a borracha de pneu sem tratamento (referência).

Figura 34 - Mudança no ângulo de contato da borracha de pneu após diferentes tempos de tratamento com NaOH



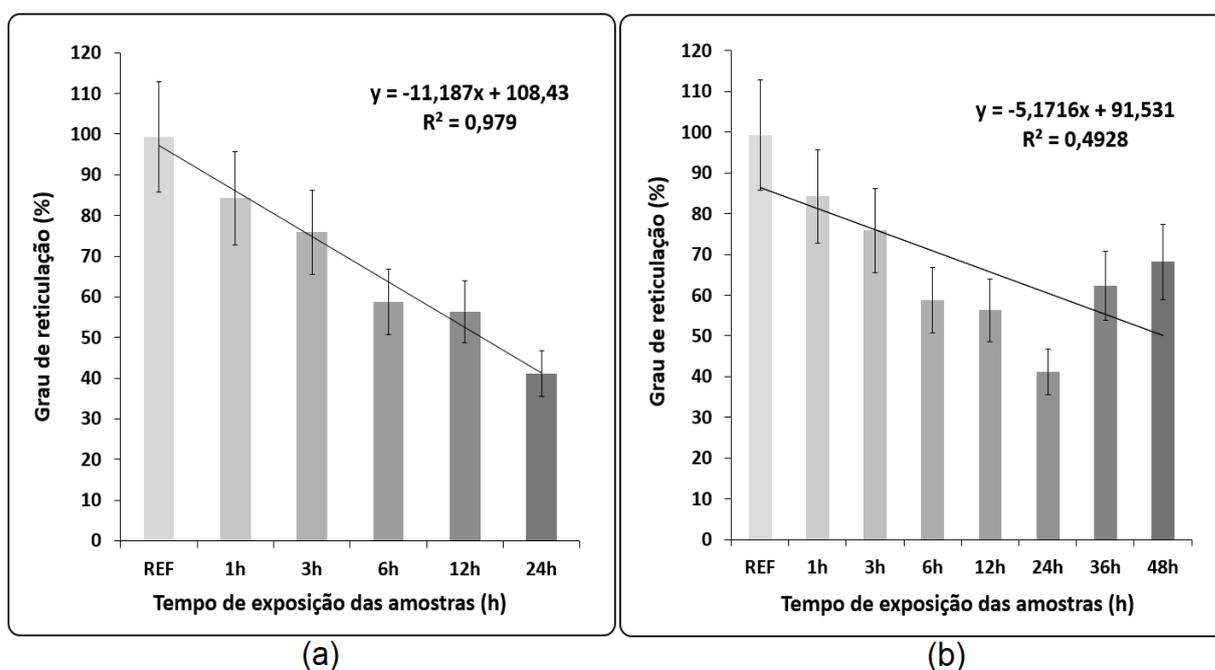
4.2 Grau de reticulação

A Figura 35 mostra o gráfico do grau de reticulação em relação ao tempo de exposição das amostras a irradiação UV e a amostra de borracha sem tratamento a fim de comparação.

Na Figura 35a, nota-se a diminuição do grau de reticulação conforme o aumento do tempo de exposição das amostras à irradiação UV. Uma modelagem de regressão linear foi aplicada, onde o coeficiente de correlação correspondente (R^2) registrou 0,979, o que caracteriza um ótimo ajuste. Essa diminuição do grau de reticulação, indica quebra das ligações cruzadas C-S que haviam sido criadas através da vulcanização da borracha, demonstrando uma efetiva redução da vulcanização da borracha, com um melhor resultado em 24 h de exposição.

Na Figura 35b, observa-se que após 24 h de exposição, houve um aumento no grau de reticulação para as amostras de 36 h e 48 h de exposição. Esse aumento de reticulação, refere-se a criação de novas ligações C-C e C-S, formando uma nova rede tridimensional, reafirmando os resultados referentes ao ângulo de contato e o mecanismo da Figura 17c que mostram uma regeneração da borracha, conforme reportado por (ABOELKHEIR et al., 2021b).

Figura 35 - Mudança no grau de reticulação da borracha de pneu após diferentes tempos de exposição à irradiação UV: (a) até 24 h e (b) até 48 h.



O erro apresentado possui uma dispersão grande devido ao ensaio ser muito sensível, porém nota-se uma tendência na curva indicada. Como no ensaio do ângulo de contato, até 24 h de exposição verifica-se um decaimento, e a partir de 36 h observa-se um aumento no grau de reticulação. Ambos são explicados pelos mecanismos vistos na Figura 17c, onde mostram respectivamente, a degradação e a regeneração da borracha.

4.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 36 mostra os espectros de FTIR das amostras borracha modificadas por UV. Todos os modos de vibração dos espectros FTIR estão representados na Tabela 3. Nos espectros de borracha, apresentados na Figura 36, é possível observar algumas bandas características importantes: uma banda característica ampla em 3350 cm^{-1} , atribuído ao alongamento OH; um duplete de bandas características em 2916 e 2848 cm^{-1} , relacionadas ao alongamento da ligação C-H em grupos CH_2 e CH_3 ; a banda característica em 1637 cm^{-1} , designada como o C=O conjugado com o alongamento C=C; 3 bandas características em 1537, 1493 e 1455 cm^{-1} , respectivamente, atribuídas ao alongamento assimétrico e simétrico de C=C no esqueleto do anel aromático; a banda característica em 1085 cm^{-1} , designada como S=O e alongamento conjugado com SO_2 ; e a banda característica em 808 cm^{-1} , designada como curvatura C-H do anel fora do plano (ABOELKHEIR et al., 2021b; BUONERBA et al., 2014; SHAO et al., 2016; SILVERSTEIN; WEBSTER, 2000; WANG et al., 2015).

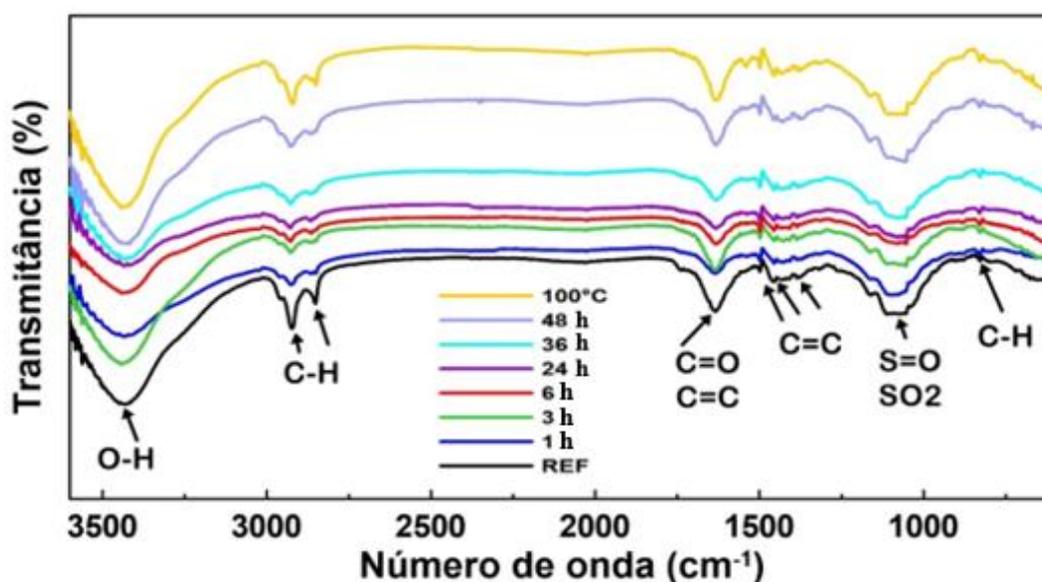
Tabela 3 - Índice dos modos de vibração dos espectros FTIR de borracha de pneu após a exposição à radiação UV em diversos períodos

Bandas características cm^{-1}	Atribuição de cada banda
3350	O-H Estiramento
2916	C-H Estiramento de CH_2 e CH_3
2848	
1637	C=O & C=C Estiramento conjugado
1537	C=C Estiramento assimétrico e simétrico no anel aromático
1493	
1455	
1085	S=O & SO_2 Estiramento conjugado
808	C-H do anel fora do plano

As bandas características em 2916, 2848, 1537, 1493, e 1455 cm^{-1} , representando as principais bandas de borracha GTR, foram reduzidas com o aumento do tempo de exposição à radiação UV, indicando que parte da cadeia polimérica foi alterada por meio de cisões de ligações C-C e C-S (mecanismo de amolecimento); isto é, uma degradação tende a ocorrer nas cadeias da borracha (Figura 36). Esse efeito é mais evidente nos períodos de exposição de até 24 h, o que pode limitar as propriedades mecânicas gerais da borracha recuperada, porém com o aumento do tempo de exposição

para 36 h e 48 h é possível observar um aumento nas mesmas bandas citadas devido à formação de novas ligações, corroborando os dados do teste de grau de reticulação. A borracha fervida em água obteve um resultado similar a um tempo de exposição de 48 h, conforme mostra a Figura 36.

Figura 36 - Bandas de absorção de FTIR de v-SBR após a exposição à irradiação UV em diversos períodos.



A banda característica em 3350 cm^{-1} , atribuída como o alongamento O-H, não sofreu uma mudança muito significativa com o aumento de tempo de exposição à irradiação UV. A banda característica em 1637 cm^{-1} , atribuída como C=O conjugado com estiramento de C=C, a banda característica em 1085 cm^{-1} , atribuída como S=O e estiramento conjugado de SO₂, não sofreram mudanças significativas com o aumento do tempo de exposição à irradiação UV. Essas bandas são todas atribuídas a grupos funcionais polares, que era esperado que sejam detectadas em maiores intensidades após a irradiação de UV, de acordo com um estudo similar sobre a borracha de SBR. A divergência do resultado pode ser atribuída à presença de negro de fumo na composição química de borracha de pneu que, por sua vez, pode atrapalhar tanto na absorção da irradiação de UV quanto durante os ensaios espectroscópicos. Este efeito pode explicar a razão de não ter uma diminuição significativa no ângulo de contato de GTR após a exposição à irradiação UV, conforme mostra a Figura 32.

4.4 TGA-DTG

A Figura 37 mostra as curvas termogravimétricas (TGA) e as respectivas derivadas (DTG) de amostras tratadas com UV. As amostras tratadas registraram um comportamento térmico diferente da amostra de controle REF. Para as amostras tratadas em até 1 h e 3 h, as respectivas curvas de TGA e DTG são semelhantes (Figura 38), e, ao mesmo tempo, outra semelhança pode ser observada entre as demais amostras, incluindo a de fervura em água a 100 °C (Figura 38). Pequenas diferenças nas substâncias residuais a 600 °C, devido à presença de substâncias inorgânicas, que participaram do processo de vulcanização, foram observadas.

De acordo com as curvas da primeira derivada (DTG), todas as amostras mostram dois eventos térmicos referentes à saída dos diversos tipos de borrachas presentes na composição química de GTR. A amostra REF, por sua vez, apresenta esses eventos em temperaturas inferiores às outras amostras tratadas. A temperatura dos picos de ambos os eventos térmicos, para todas as amostras, encontra-se na Tabela 4. Tal fato mostra que, após o tratamento, as amostras ganham uma maior resistência térmica, levando as mesmas a apresentarem uma taxa de degradação em temperaturas mais elevadas, se comparadas à amostra REF. Além disso, os picos das curvas de DTG, para todas as amostras tratadas, apresentam uma má resolução, o que indica maior entrelaçamento das cadeias da borracha de GTR após o tratamento, tal fato afirma que o tratamento causou mudanças significativas nas cadeias poliméricas levando a maior resistência térmica.

Tabela 4 - Dados de decomposição térmica da borracha de pneu após a exposição à irradiação UV, estimados a partir de curvas de DTG.

Amostra	Pico 1	Pico 2
Ref	349,7	381,1
1 h	363,6	413,65
3 h	366,16	413,1
6 h	376,04	430,07
12 h	378,06	429,9
24 h	377,6	430,7
36 h	379,5	427,9
48 h	378,7	428,3
100 °C	374,5	430,8

Figura 37 - Curvas TG/DTG de borracha de pneu após diferentes tempos de exposição à irradiação UV.

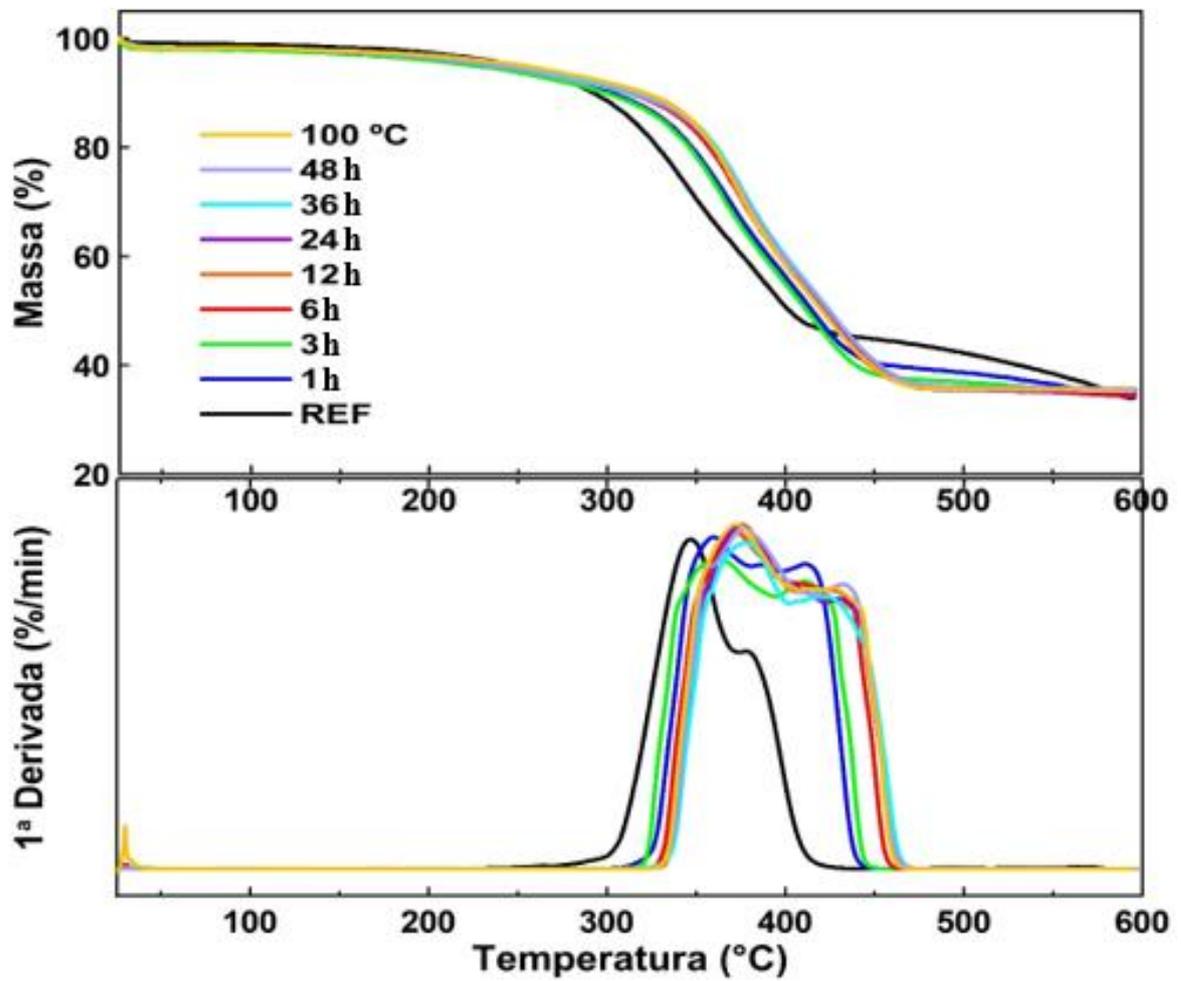
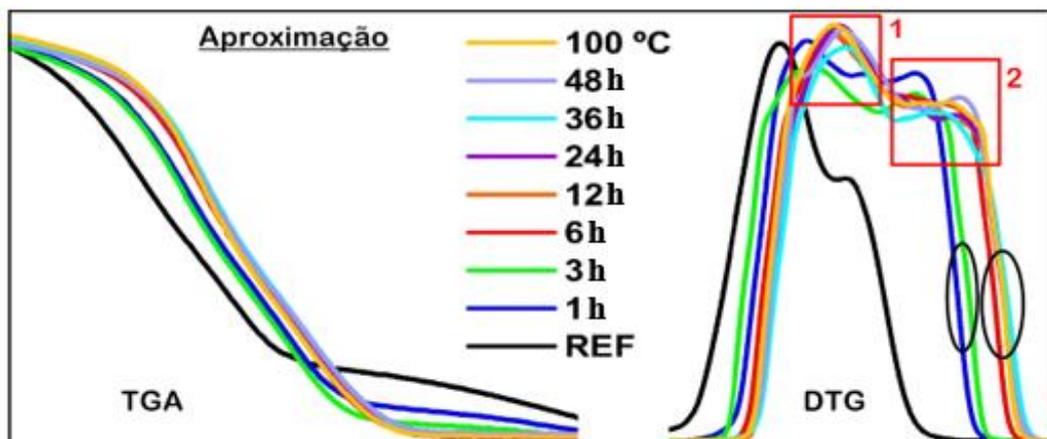


Figura 38 - Curvas TG/DTG, com aproximação, de borracha de pneu após diferentes tempos de exposição à irradiação UV.



A Tabela 5 mostra a temperatura de degradação após 2, 5, 10, 50 e 60 % de decomposição do GTR para todas as amostras tratadas, bem como o resíduo inorgânico a 600 °C. Com base na Tabela 4, observou-se que há uma tendência geral decrescente de T-2%, T-5%, T-60%, o que correspondeu a 2, 5 e 60 % de perda de massa, enquanto um efeito contrário foi observado de T-10%, T-50%, o que correspondeu a 10 e 50 % de perda de massa. O resíduo inorgânico não sofreu mudanças significativas para todas as amostras.

Em geral, como os mecanismos duplos de softening e hardening, conforme Figura 38, estão ocorrendo ao mesmo tempo na estrutura de GTR pela aplicação de irradiação UV, torna-se desafiador estudar o comportamento térmico pela técnica de TGA, pois as ligações recém-formadas (hardening) influenciam positivamente a estabilidade térmica de as amostras de GTR (ABOELKHEIR et al., 2021b; JANOWSKA; RYBIŃSKI, 2009).

Tabela 5 - Dados de decomposição térmica da borracha de pneu após a exposição à irradiação UV, estimados a partir de curvas de TGA.

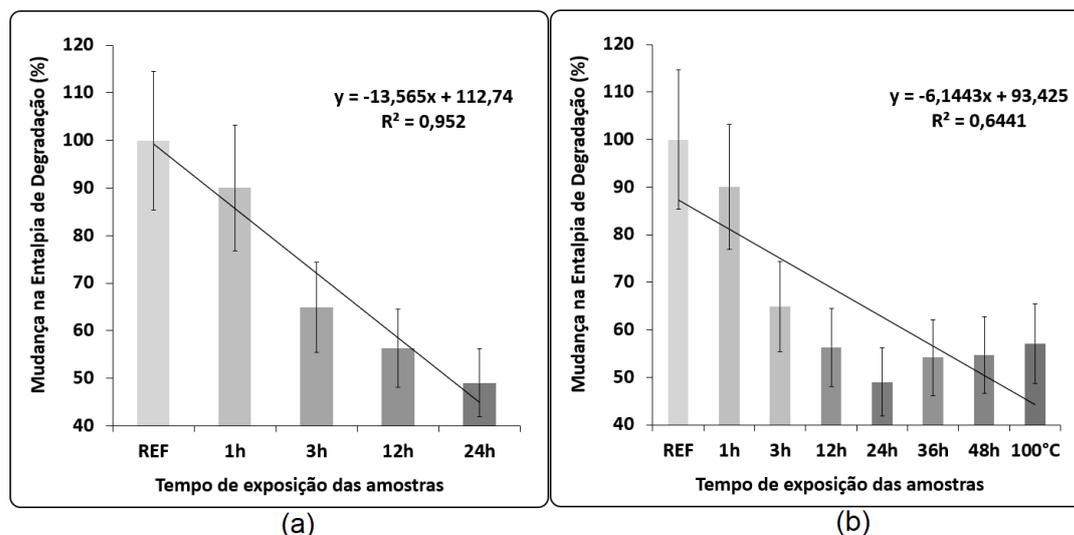
Amostra	T-2% (C°)	T-5% (C°)	T-10% (C°)	T-50% (C°)	T-60% (C°)	Resíduo Inorgânico (%)
REF	182,5	249,2	292,7	402,6	531,8	35,8
1 h	99,5	236,3	302,4	415,1	457,1	33,9
3 h	99,6	228,3	301,0	412,3	440,1	34,3
6 h	117,6	238,7	311,1	420,7	447,5	34,2
12 h	120,6	243,1	314,4	422,2	449,2	34,7
24 h	123,5	242,5	314,4	421,6	448,6	34,8
36 h	128,1	241,5	316,6	424,8	452,9	35,4
48 h	118,9	234,9	311,1	424,3	452,9	35,6
100 °C	126,0	252,8	320,8	420,5	448,1	35,2

4.5 DSC

A Figura 39 mostra a alteração da entalpia de degradação em função do tempo, estimada a partir dos dados de DSC. Uma taxa de entalpia de degradação decrescente (regressão linear, $R^2 = 0,979$), foi observada com o aumento do tempo de exposição à irradiação UV até 24 h de exposição, entretanto, a mudança da entalpia foi crescente a partir de 36 h e também para a borracha fervida em água, onde o valor de R^2 foi bem

reduzido para 0,6441, indicando menor linearidade na resposta a partir de 36 h de tratamento.

Figura 39 - Mudança na entalpia de degradação da borracha de pneu após diferentes tempos de exposição à irradiação UV: (a) até 24 h e (b) até 48 h.



Com base nos resultados do FTIR, os fenômenos de degradação e desvulcanização em até 24 h tendem a diminuir a quantidade de algumas ligações características importantes, como C-H, C-S e S-S (softening) com entalpias de ligação médias iguais a 414, 289 e 266 kJ/mol, respectivamente. Aplicando esse raciocínio, as amostras de GTR tendem a apresentar menor entalpia de degradação geral, com o aumento do tempo de exposição à irradiação UV de acordo com os resultados apresentados na Figura 39, onde as amostras de borracha tratada com UV em 1 h, 3 h, 12 h, e 24 h registraram uma diminuição porcentual de entalpia em até 51 % na faixa de temperatura entre 200 °C e 600 °C (Tabela 6).

Tabela 6 - Dados de mudança da entalpia de degradação de borracha de pneu após a exposição à irradiação UV, estimados a partir de curvas de DSC.

Amostra	Área Integrada	d H (%)
Ref	158.779,20	100
1h	142.906,23	90,00
3h	103.011,80	64,87
12h	89.423,37	56,31
24h	77.826,15	49,01
36h	85.994,21	54,15
48h	86.883,49	54,71
100°C	90.674,86	57,10

Seção B:

Nesta seção, serão apresentados os resultados das propriedades mecânicas para todo o conjunto de misturas, sendo subdivididas em:

- Compósitos com borracha não tratada (REF-SEM, REF-B5, REF-B10, REF-B15 e REF-B20)
- Compósitos com borracha tratada com NaOH por 30, 40 e 50 minutos [REF-SEM, (NaOH30-5, NaOH30-10, NaOH30-15, NaOH30-20), (NaOH40-5, NaOH40-10, NaOH40-15, NaOH40-20), (NaOH50-5, NaOH50-10, NaOH50-15 e NaOH50-20)]
- Compósitos com borracha tratada com UV por 12 horas (REF-SEM, UV12-5, UV12-10, UV12-15 e UV12-20).

E por fim, será feita uma comparação entre as amostras subdivididas.

4.6 Resistência à compressão

4.6.1 Compósitos com borracha não tratada

A Tabela 7 apresenta os resultados médios dos valores de resistência à compressão das argamassas controle e com borracha de pneu sem tratamento ensaiadas aos 28 dias. A Figura 40 apresenta a influência da adição da borracha na resistência à compressão das misturas controle e borracha de pneu sem tratamento.

Observa-se que a amostra REF-SEM (controle) atingiu o maior valor de resistência à compressão com 47,73 MPa, enquanto REF-B20 atingiu o menor valor com 25,01 MPa. A adição de 5% de borracha resultou em uma queda de 16,36% na resistência à compressão, já na adição de 20% o decaimento foi de 47,6%. Isso mostra que com a adição de borracha de pneu há um decaimento linear na resistência à compressão.

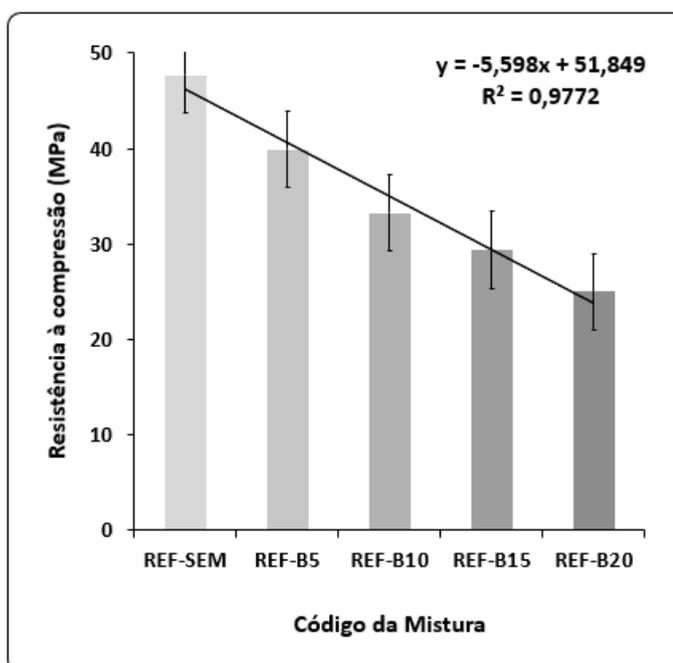
Na presença da borracha hidrofóbica, a água não se migra com facilidade dentro da mistura tendo como obstáculo as partículas da borracha, que, por sua vez, acabam cobrindo os grãos anidros de cimento, piorando a resistência. Além da própria natureza

dúctil da borracha que se comporta como um vazio dentro da mistura em não transferir a carga de ponto para outro, provocando maiores fissurações.

Tabela 7 - Representação numérica da resistência à compressão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu sem tratamento.

Código da Mistura	Tensão (MPa)	Des. Pad.	CoV (%)
REF-SEM	47,73	0,20	3,53
REF-B5	39,92	1,74	4,36
REF-B10	33,24	0,43	1,30
REF-B15	29,38	0,46	1,58
REF-B20	25,01	1,04	4,16

Figura 40 - A influência da adição da borracha na resistência à compressão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu sem tratamento.



4.6.2 Compósitos com borracha tratada com NaOH

A Tabela 8 apresenta os resultados médios dos valores de resistência à compressão das argamassas controle e com borracha tratada por imersão em NaOH por 30, 40 e 50 minutos, respectivamente, ensaiadas aos 28 dias. A Figura 41 apresenta a

influência da adição da borracha tratada por imersão em NaOH por (a) 30, (b) 40 e (c) 50 minutos na resistência à compressão das misturas.

Para o tratamento durante 30 minutos, é possível observar que para 5% de substituição de areia pela borracha, houve uma queda de 10,22% no valor da resistência em relação à amostra REF-B5, já para 20% de substituição houve um aumento de 12,71% em relação à amostra REF-B20. Por outro lado, para as misturas com borracha tratada em 40 minutos as quedas foram de 3,06% e 4,44% para as substituições de 5 e 20%, respectivamente. E para as misturas com borracha tratada em 50 minutos, houve um aumento de 5,84% e uma queda de 32% para as substituições de 5 e 20%, respectivamente.

Avaliando o tempo de imersão em NaOH, observa-se que para 30 minutos de imersão, houve um aumento de 3,94% (NaOH30-10) e 2,07% (NaOH30-15) em relação às amostras REF-B10 e REF-B15, respectivamente. Já para 40 minutos de imersão, houve um aumento de 8,6% (NaOH40-10) e 3,54% (NaOH40-15). Enquanto para 50 minutos, houve uma queda de 18,14% (NaOH50-10) e 25,66% (NaOH50-15).

Tabela 8 - Representação numérica da resistência à compressão (MPa) para as misturas de controle e com borracha tratada por imersão em NaOH por 30, 40 e 50 minutos.

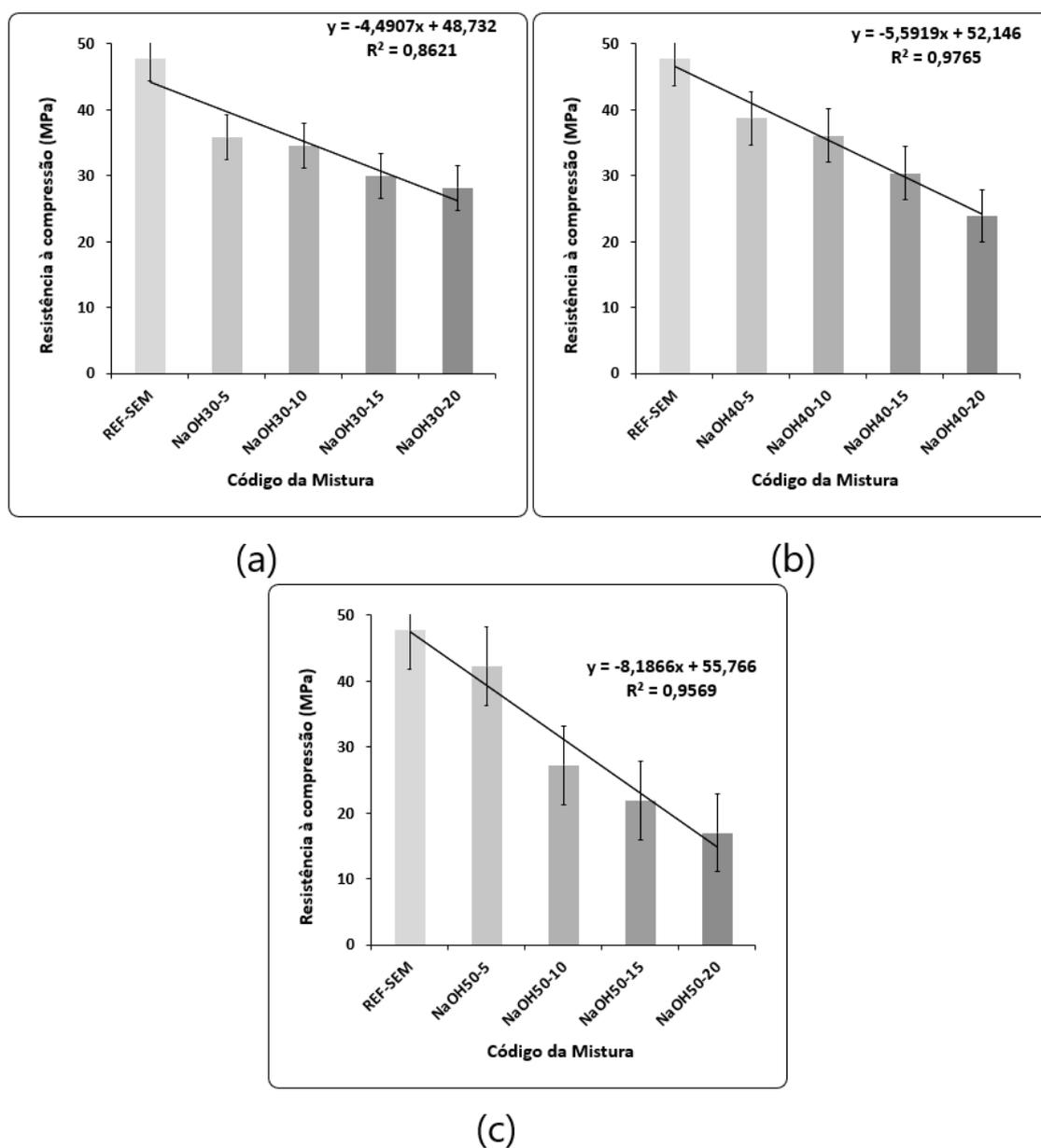
Código da Mistura	Deslocamento (mm)	Tensão (MPa)	Des. Pad.	CoV (%)
REF-SEM	1,83	47,73	0,20	3,53
NaOH30-5	1,39	35,84	0,93	2,59
NaOH30-10	1,35	34,55	0,07	0,20
NaOH30-15	1,31	29,99	0,04	0,12
NaOH30-20	1,23	28,19	0,17	0,61
NaOH40-5	1,64	38,70	1,32	3,41
NaOH40-10	1,66	36,10	1,07	2,96
NaOH40-15	1,53	30,42	0,53	1,74
NaOH40-20	1,16	23,90	0,11	0,44
NaOH50-5	1,68	42,25	0,09	0,22
NaOH50-10	1,26	27,21	1,13	4,14
NaOH50-15	1,06	21,84	1,20	5,47
NaOH50-20	0,90	17,00	0,15	0,91

Comparando os resultados obtidos por imersão em NaOH por 30 e 40 minutos, observa-se que com 40 minutos de imersão os valores da resistência à compressão são mais próximos e/ou aos maiores em relação aos da borracha sem tratamento. Além disso, com 10% de adição de borracha a amostra NaOH40-10 apresentou a maior

porcentagem de aumento na resistência à compressão em relação às amostras com borracha sem tratamento.

A amostra NaOH50-5 atingiu um aumento de 5,84% em relação à amostra REF-B5. Enquanto isso, nota-se que nas outras amostras com 50 minutos de tratamento, o aumento da adição de borracha faz com que a resistência diminua rapidamente. O maior tempo de imersão em NaOH pode ter degradado a borracha, afetando assim negativamente a sua estrutura.

Figura 41 - A influência da adição da borracha tratada por imersão em NaOH por: (a) 30 minutos; (b) 40 minutos e (c) 50 minutos na resistência à compressão (MPa).



4.6.3 Compósitos com borracha tratada com UV

A Tabela 9 apresenta os resultados médios dos valores de resistência à compressão das argamassas controle e com borracha de pneu tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas ensaiadas aos 28 dias. A Figura 42 apresenta a influência da adição da borracha na resistência à compressão para as misturas de controle e com borracha de pneu tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas.

Observa-se que a maior resistência à compressão foi atingida pela amostra REF-SEM (47,73 MPa), onde não há a presença de borracha, e a menor resistência à compressão foi encontrada na amostra UV12-20 com um valor de 10,54 MPa. A adição de apenas 5% de borracha tratada via radiação UV (UV12-5) resultou em uma queda extremamente significativa (43,11%) em relação à amostra REF-B5. E a amostra UV12-20 obteve um decaimento de 57,85% em relação à amostra com substituição de 20% de borracha sem tratamento (REF-B20).

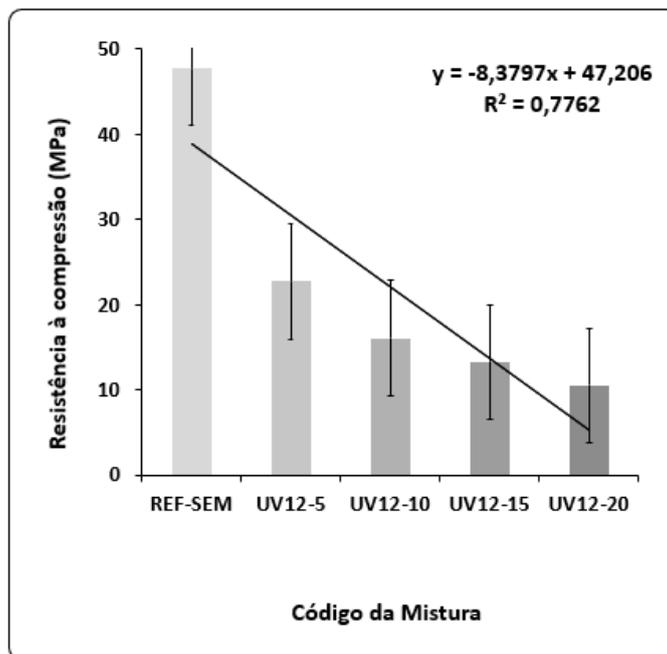
Comparando os valores de resistência via tratamento UV e sem tratamento, nota-se que os maiores valores de resistência à compressão foram obtidos pelas amostras sem tratamento em todas as substituições analisadas.

O tratamento via UV não obteve o aumento de resistência esperado, pois apesar do tratamento ter influenciado a estrutura da borracha de pneu, isso não foi suficiente para melhorar as pontes de aderência com a matriz cimentícia.

Tabela 9 - Representação numérica da resistência à compressão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas.

Código da Mistura	Tensão (MPa)	Des. Pad.	CoV (%)
REF-SEM	47,73	0,20	3,53
UV12-5	22,71	0,48	2,10
UV12-10	16,08	0,99	6,13
UV12-15	13,28	0,49	3,70
UV12-20	10,54	0,12	1,16

Figura 42 - A influência da adição da borracha na resistência à compressão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas.



Analisando os resultados de resistência à compressão das amostras, observa-se que em todos os grupos de amostra houve decaimento da resistência conforme o aumento da substituição do agregado fino (areia) pela borracha.

Analisando os resultados referentes as técnicas utilizadas para o tratamento prévio da borracha, verifica-se que o tratamento via UV fez com que a resistência da argamassa com borracha caísse significativamente para todas os teores de adição de borracha. Já para as amostras tratadas via imersão em NaOH, para alguns teores de adição, essas amostras obtiveram resultados melhores do que as com borracha sem tratamento. Isso possivelmente ocorreu devido à borracha ter adquirido mais grupos polares em sua estrutura no tratamento via NaOH do que no tratamento via irradiação UV, o que melhorou sua adesão à matriz cimentícia.

4.7 Resistência à tração na flexão

4.7.1 Compósitos com borracha não tratada

A Tabela 10 apresenta os resultados médios dos valores de resistência à tração na flexão das argamassas controle e com borracha de pneu sem tratamento ensaiadas aos 28 dias. A Figura 43 apresenta a influência da adição da borracha na resistência à tração na flexão das misturas controle e com borracha de pneu sem tratamento.

Observa-se que a amostra REF-SEM, que não possui borracha em sua composição, atingiu o maior valor de resistência à tração na flexão (9,81 MPa) em relação as outras amostras de referência analisadas.

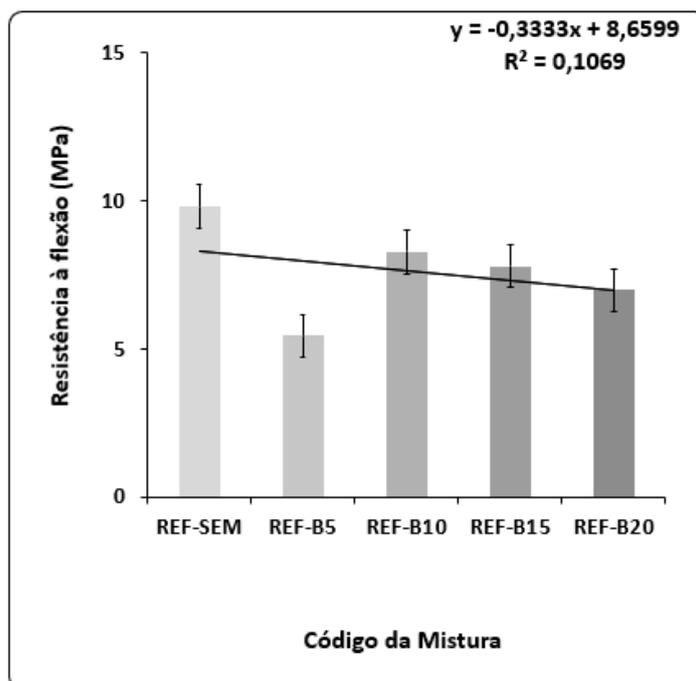
Com a adição de 10% de borracha sem tratamento houve uma queda de 15,7% na resistência à tração na flexão em relação à amostra sem borracha, enquanto com 20% de adição, a queda foi de 28,8%.

Da mesma forma que foi observado na resistência à compressão, a resistência à tração na flexão diminui com o aumento do teor de borracha dentro da mistura. Isso ocorre devido à borracha ser hidrofóbica dificultando assim, a migração da água dentro da mistura, e conseqüentemente, piorando a resistência da mistura conforme o aumento da substituição da borracha na mistura.

Tabela 10 - Representação numérica da resistência à tração na flexão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu sem tratamento.

Código da Mistura	Deslocamento (mm)	Tensão (MPa)	Des. Pad.	CoV (%)
REF-SEM	0,92	9,81	1,16	11,82
REF-B5	0,80	5,45	0,28	5,18
REF-B10	0,74	8,27	0,98	11,83
REF-B15	0,68	7,78	0,18	2,37
REF-B20	0,69	6,98	1,48	21,24

Figura 43 - A influência da adição da borracha na resistência à tração na flexão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu sem tratamento.



4.7.2 Compósitos com borracha tratada com NaOH

A Tabela 11 apresenta os resultados médios dos valores de resistência à tração na flexão das argamassas controle e com borracha de pneu tratada a 30, 40 e 50 minutos por imersão em NaOH ensaiadas aos 28 dias. A Figura 44 apresenta a influência da adição da borracha na resistência à tração na flexão das misturas controle e com borracha de pneu tratada a 30, 40 e 50 minutos por imersão em NaOH.

Observa-se que a amostra REF-SEM, que não possui borracha em sua composição, atingiu o maior valor de resistência à tração na flexão (9,81 MPa) em relação às amostras de borracha tratadas via NaOH analisadas. Nota-se que a adição de 5% de borracha tratada via NaOH apresenta uma resistência maior em relação às outras substituições, isso condiz com o melhor valor de ângulo de contato encontrado para NaOH50 que mostra uma melhor afinidade da borracha com a água.

Entre as amostras tratadas via NaOH, a amostra NaOH50-5 apresentou o maior valor de resistência à tração na flexão (9,55 MPa), enquanto a amostra NaOH50-20 apresentou o menor valor de resistência à tração na flexão (4,70 MPa) em relação às outras amostras analisadas.

Para o tratamento durante 30 minutos, é possível observar que para 5% de substituição de areia pela borracha, houve um aumento de 50% no valor da resistência em relação à amostra REF-B5, já para 20% de substituição houve um aumento de 11,46% em relação à amostra REF-B20. Por outro lado, para as misturas com borracha tratada em 40 minutos os aumentos foram de 72,11% e 1,15% para as substituições de 5 e 20%, respectivamente. E para as misturas com borracha tratada em 50 minutos, houve um aumento de 75,22% e uma queda de 32,7% para as substituições de 5 e 20%, respectivamente.

Avaliando o tempo de imersão em NaOH, observa-se que para 30 minutos de imersão, houve uma queda de 32,16% (NaOH30-10) e um aumento de 3,47% (NaOH30-15) na resistência à tração na flexão em relação às amostras REF-B10 e REF-B15, respectivamente. Já para 40 minutos de imersão, houve um decréscimo de 1,33% (NaOH40-10) e um aumento de 2,31% (NaOH40-15). Enquanto para 50 minutos, houve uma queda de 10,76% (NaOH50-10) e 23,9% (NaOH50-15).

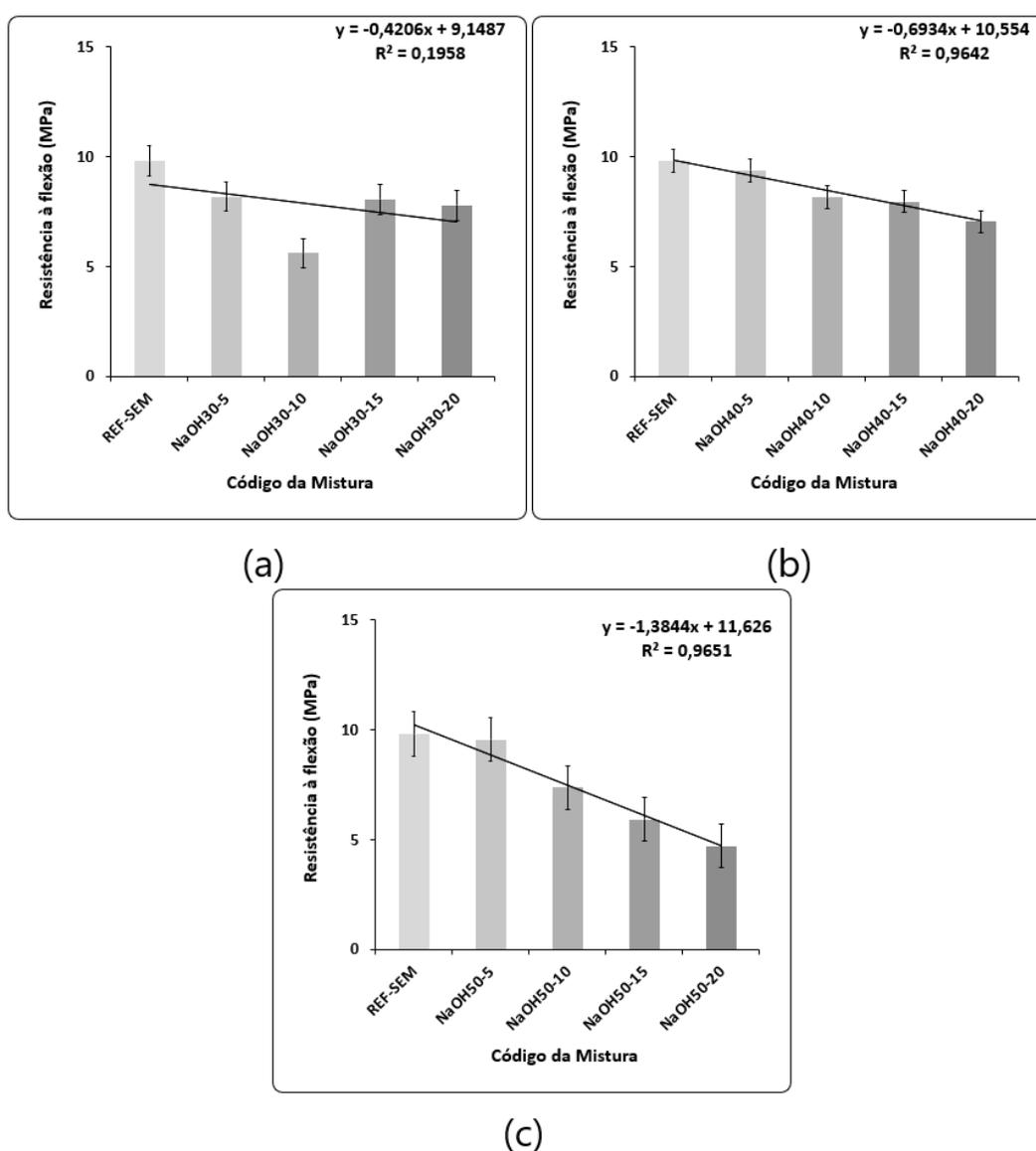
Tabela 11 - Representação numérica da resistência à tração na flexão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu tratada a 30, 40 e 50 minutos por imersão em NaOH, separadamente.

Código da Mistura	Deslocamento (mm)	Tensão (MPa)	Des. Pad.	CoV (%)
REF-SEM	0,92	9,81	1,16	11,82
NaOH30-5	0,62	8,18	0,78	9,50
NaOH30-10	0,41	5,61	4,87	86,77
NaOH30-15	0,63	8,05	0,35	4,28
NaOH30-20	0,81	7,78	0,47	5,98
NaOH40-5	0,69	9,38	0,16	1,72
NaOH40-10	0,85	8,16	0,27	3,25
NaOH40-15	0,60	7,96	0,67	8,36
NaOH40-20	0,53	7,06	0,28	4,00
NaOH50-5	0,66	9,55	0,70	7,38
NaOH50-10	0,64	7,38	0,31	4,21
NaOH50-15	0,56	5,92	0,44	7,35
NaOH50-20	0,48	4,70	0,67	14,21

Comparando esses resultados obtidos por imersão em NaOH por 30 e 40 minutos, observa-se que a amostra NaOH40-10 atingiu um valor de resistência à tração na flexão mais próximo em relação ao da borracha sem tratamento (REF-B10). Já a amostra NaOH30-15 apresentou a maior porcentagem de aumento na resistência relação à amostra com borracha sem tratamento (REF-B15).

Nota-se que nas amostras com um teor maior de 5% de adição da borracha em 50 minutos de tratamento a resistência à tração na flexão, da mesma maneira que a resistência à compressão, decai rapidamente com o aumento da porcentagem de adição da borracha. O maior tempo de imersão em NaOH pode ter degradado a borracha, afetando assim negativamente a sua estrutura.

Figura 44 - A influência da adição da borracha na resistência à tração na flexão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu tratada a 30, 40 e 50 minutos por imersão em NaOH, separadamente.



4.7.3 Compósitos com borracha tratada com UV

A Tabela 12 apresenta os resultados médios dos valores de resistência à tração na flexão das argamassas controle e com borracha de pneu tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas ensaiadas aos 28 dias. A Figura 45 apresenta a influência da adição da borracha na resistência à tração na flexão das misturas controle e com borracha de pneu tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas.

Observa-se que a amostra REF-SEM, que não possui borracha em sua composição, atingiu o maior valor de resistência à tração na flexão, 9,81 MPa, em relação às amostras de borracha tratadas via exposição à irradiação UV analisadas. Nota-se que a adição de 5% de borracha tratada via exposição à irradiação UV apresenta uma resistência maior (6,86 MPa) em relação às outras substituições.

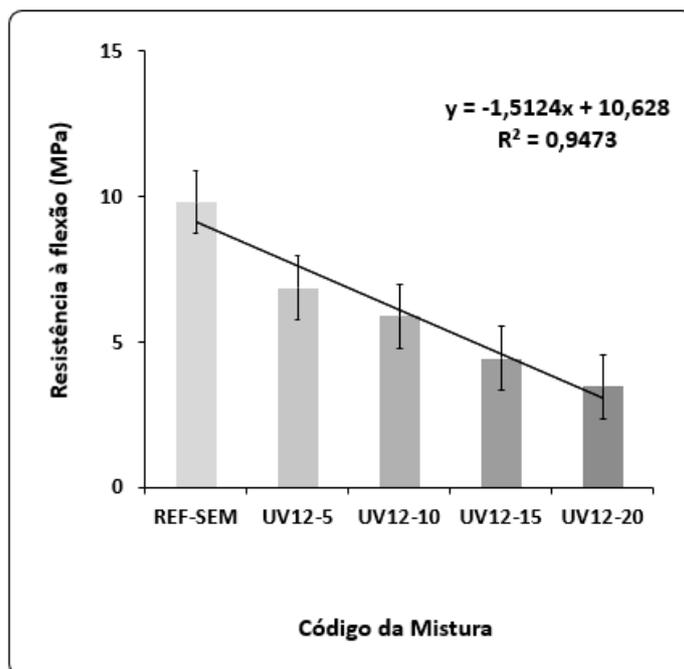
O decaimento da resistência à tração na flexão é muito expressivo com o aumento na adição de borracha de pneu, como pode ser observado na amostra UV12-20. Essa amostra refere-se à adição de 20% de borracha de pneu tratada via exposição à irradiação UV e atingiu uma queda de 50,28% em relação a amostra REF-B20.

Essas comparações entre os valores de resistência à tração na flexão das amostras de borracha não tratadas e as tratadas via exposição à irradiação UV mostram que o tratamento da borracha por esta técnica não foi eficaz no aumento da resistência à tração na flexão.

Tabela 12 - Representação numérica da resistência à tração na flexão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas.

Código da Mistura	Deslocamento (mm)	Tensão (MPa)	Des. Pad.	CoV (%)
REF-SEM	0,92	9,81	1,16	11,82
UV12-5	0,69	6,86	0,25	3,68
UV12-10	0,57	5,89	0,11	1,84
UV12-15	0,46	4,42	0,22	4,94
UV12-20	0,43	3,47	0,20	5,77

Figura 45 - A influência da adição da borracha na resistência à tração na flexão (MPa) para as misturas de controle e com borracha de pneu tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas.



A substituição de 5% de borracha não tratada (REF-B5) ocasionou uma queda de 44,4% em relação à amostra sem borracha (REF-SEM). Enquanto para as amostras tratadas de NaOH30-5, NaOH40-5, NaOH50-5 e UV12-5, os decaimentos foram de 16,61%, 4,38%, 2,65% e 30%, respectivamente. Observa-se que para as amostras tratadas, o decaimento da resistência foi menor em relação à amostra não tratada com o mesmo teor de adição de borracha.

Observa-se que quanto maior a adição de borracha na mistura menor é sua resistência à tração na flexão. Nota-se que a borracha de pneu tratada a 30, 40 e 50 minutos por imersão em NaOH obteve um menor decréscimo do valor da resistência à tração na flexão em relação ao tratamento via exposição à irradiação UV.

Analisando os resultados referentes as técnicas utilizadas para o tratamento prévio da borracha na resistência à tração na flexão, verifica-se que o tratamento via UV fez com que a resistência da argamassa com borracha caísse significativamente. Enquanto para alguns teores de substituição, o tratamento via imersão em NaOH atingiu valores maiores em relação à amostra não tratada com o mesmo teor de adição de borracha. Isso possivelmente ocorreu devido à borracha ter

adquirido mais grupos polares em sua estrutura no tratamento via NaOH do que no tratamento via irradiação UV, o que melhorou sua adesão à matriz cimentícia.

4.8 Módulo de elasticidade dinâmico

4.8.1 Compósitos com borracha não tratada

A Tabela 13 apresenta os dados da densidade aparente, velocidade de propagação e módulo de elasticidade dinâmico (MPa) para a mistura de controle sem borracha (REF-SEM) e com borracha de pneu sem tratamento. A Figura 46 apresenta a influência da adição da borracha de pneu no módulo de elasticidade dinâmico das misturas de controle e de borracha de pneu.

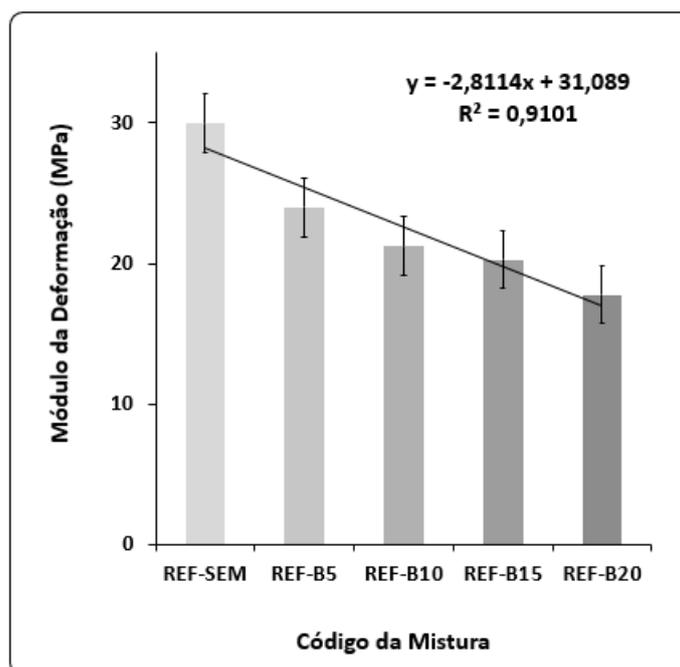
Com a adição 5% de borracha na matriz houve um decaimento no módulo de elasticidade de 19,95% em relação à amostra sem borracha (REF-SEM). E com 20% de adição, o decaimento foi de 40,69%.

Para as misturas de borracha, as mesmas se destacaram por uma queda significativa nos valores do módulo de elasticidade dinâmico se comparadas com a mistura de controle (REF-SEM). Isto destaca uma deformabilidade muito superior para os compósitos contendo borracha de pneu, o que favorece este tipo de material a ser aplicado em ambientes que exigem baixa carga alta deformabilidade.

Tabela 13 - Representação numérica da densidade aparente (kg/m³), velocidade de propagação (mm/μs) e módulo de elasticidade dinâmico (MPa) para as misturas de controle e com a adição de borracha de pneu sem tratamento com diferente teores.

Código da Amostra	Massa (kg)	Densidade Aparente (kg/m ³)	Velocidade (mm/μs)	Módulo Dinâmico (MPa)	Des. Padrão (MPa)	CoV (%)
REF-SEM	0,57	2,24	3,86	29,98	0,07	0,24
REF-B5	0,56	2,18	3,50	24,00	1,11	4,64
REF-B10	0,53	2,08	3,36	21,23	0,90	4,24
REF-B15	0,54	2,09	3,28	20,28	0,14	0,68
REF-B20	0,52	2,01	3,13	17,78	0,21	1,17

Figura 46 - A influência da adição de borracha no valor do módulo de deformação dinâmico (MPa) das misturas de controle para as misturas de controle e com a adição de borracha de pneu sem tratamento com diferentes teores.



4.8.2 Compósitos com borracha tratada com NaOH

A Tabela 14 apresenta os dados da densidade aparente, velocidade de propagação e módulo de elasticidade dinâmico (MPa) para as misturas sem e com borracha tratada a 30, 40 e 50 minutos por imersão em NaOH, separadamente. A Figura 47 apresenta a influência da adição da borracha tratada por 30, 40 e 50 minutos em NaOH no módulo de deformação dinâmico (MPa).

Para o tratamento durante 30 minutos, é possível observar que para 5% de substituição de areia pela borracha, houve um decréscimo de 1,58% no valor do módulo em relação à amostra REF-B5, já para 20% de substituição houve um decréscimo de 37,8% em relação à amostra REF-B20. Por outro lado, para as misturas com borracha tratada em 40 minutos os aumentos foram de 45,25% e 27% para as substituições de 5 e 20%, respectivamente. E para as misturas com borracha tratada em 50 minutos, houve um aumento de 40% e uma queda de 15,52% para as substituições de 5 e 20%, respectivamente.

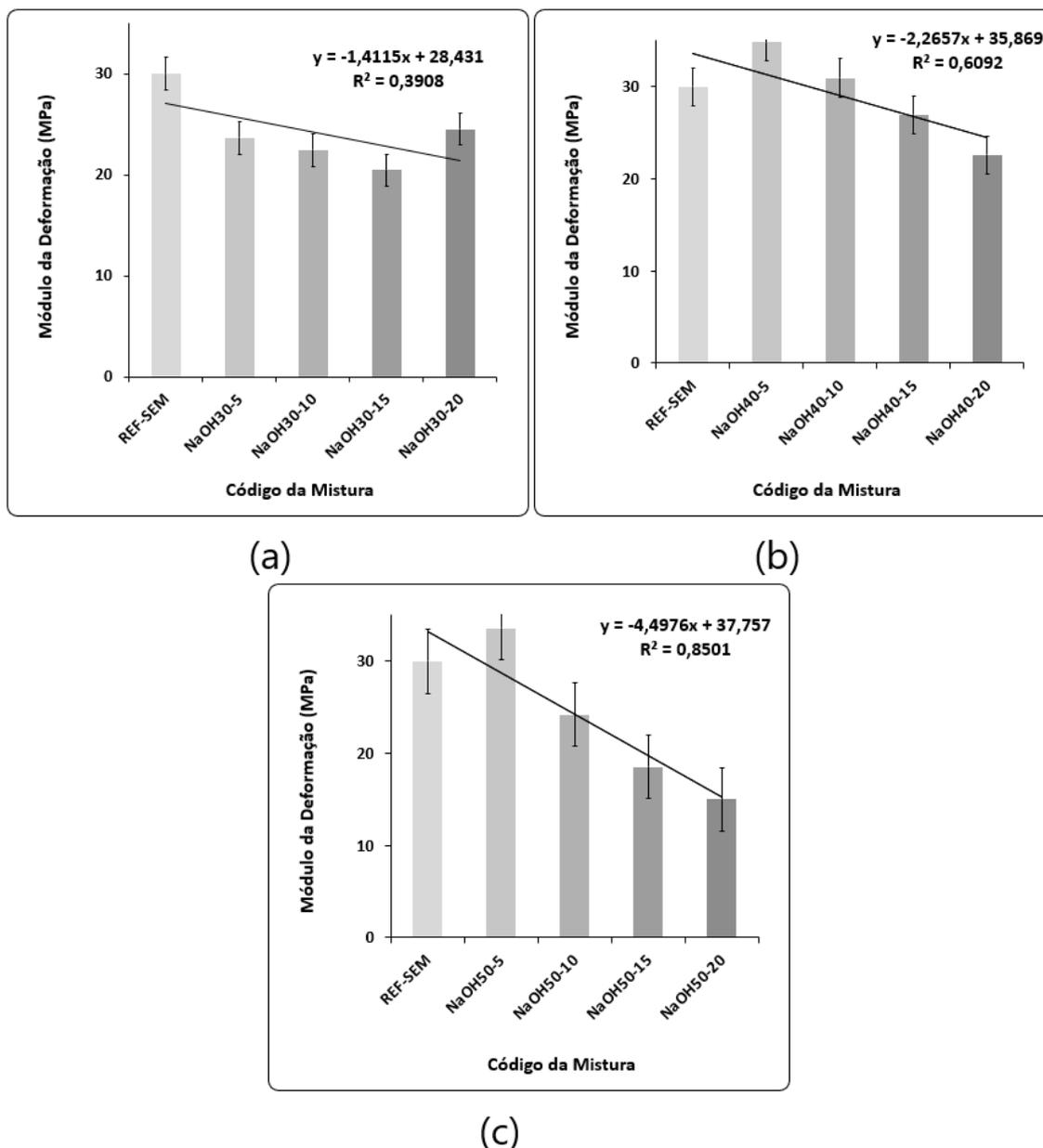
A amostra NaOH50-20 apresenta o menor módulo dinâmico entre todas as amostras tratadas com NaOH em diferentes tempos de tratamento e de adição, destacando assim deformabilidade muito superior em relação as outras amostras, o que favorece este tipo de material a ser aplicado em ambientes que exigem baixa carga e alta deformabilidade.

Há uma tendência e interesse muito altos na literatura para pesquisar meios alternativos para o uso de borracha de pneu, entre essas pesquisas as que são aplicadas no ramo de construção civil. Um dos principais desafios para os profissionais da área de construção civil é encontrar métodos que favoreçam o uso da borracha sem prejudicar às resistências do novo compósito, e, portanto, buscam diversas técnicas de tratamento da superfície da borracha para aplicar nela antes da sua inserção na mistura cimentícia. Este atual trabalho mostra que o tratamento com o NaOH depende do tempo de imersão na solução alcalina, pois a diferença de apenas 10 minutos de tratamento resulta em valores significativamente diferentes de resistência e módulo.

Tabela 14 - Dados da densidade aparente, velocidade de propagação e módulo de elasticidade dinâmico (MPa) para as misturas sem e com borracha tratada a 30, 40 e 50 minutos por imersão em NaOH, separadamente.

Código da Amostra	Massa (kg)	Densidade Aparente (kg/m³)	Velocidade (mm/μs)	Módulo Dinâmico (MPa)	Des. Padrão (MPa)	CoV (%)
REF-SEM	0,57	2,24	3,86	29,98	0,07	0,24
NaOH30-5	0,54	2,12	3,52	23,62	0,25	1,07
NaOH30-10	0,54	2,12	3,43	22,42	0,27	1,21
NaOH30-15	0,54	2,11	3,28	20,46	0,26	1,27
NaOH30-20	0,53	2,09	3,61	24,50	0,42	1,70
NaOH40-5	0,56	2,17	4,23	34,86	0,20	0,57
NaOH40-10	0,54	2,13	4,02	30,96	0,35	1,13
NaOH40-15	0,53	2,06	3,81	26,98	0,31	1,16
NaOH40-20	0,52	2,02	3,52	22,59	0,15	0,66
NaOH50-5	0,56	2,17	4,15	33,59	0,53	1,57
NaOH50-10	0,50	1,97	3,70	24,21	0,07	0,31
NaOH50-15	0,47	1,83	3,35	18,52	0,48	2,62
NaOH50-20	0,44	1,74	3,10	15,02	0,23	1,55

Figura 47 - A influência da adição da borracha tratada em NaOH por: (a) 30 minutos; (b) 40 minutos e (c) 50 minutos no módulo de deformação dinâmico (MPa).



4.8.3 Compósitos com borracha tratada com UV

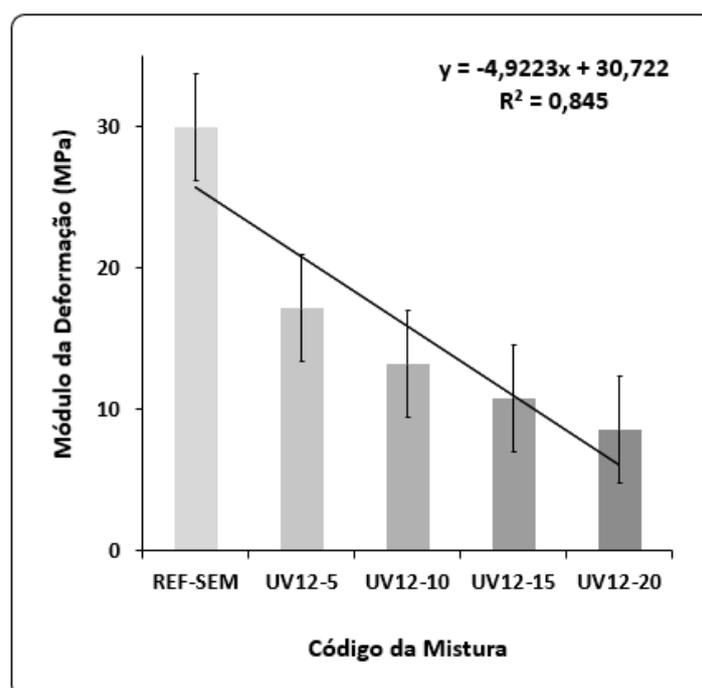
A Tabela 15 apresenta os dados da densidade aparente, velocidade de propagação e módulo de elasticidade dinâmico (MPa) para as misturas sem e com borracha tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas. A Figura 48 apresenta a influência da adição da borracha tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas no módulo de deformação dinâmico (MPa).

Observa-se um decréscimo no módulo elástico dinâmico das amostras de borracha tratadas via irradiação ultravioleta em comparação com a amostra de referência (REF-SEM). A amostra UV12-5 atingiu uma queda de 28,37% em relação à amostra REF-B5. Enquanto a amostra UV12-20 atingiu o módulo de 8,54 MPa com uma queda de 48% se comparado com a amostra REF-B20.

Tabela 15 - Dados da densidade aparente, velocidade de propagação e módulo de elasticidade dinâmico (MPa) para as misturas sem e com borracha tratada via exposição à irradiação UV por 12 horas

Código da Amostra	Massa (kg)	Densidade Aparente (kg/m³)	Velocidade (mm/μs)	Módulo Dinâmico (MPa)	Des. Padrão (MPa)	CoV (%)
REF-SEM	0,57	2,24	3,86	29,98	0,07	0,24
UV12-5	0,48	1,87	3,20	17,19	0,34	1,96
UV12-10	0,45	1,76	2,89	13,22	0,25	1,91
UV12-15	0,42	1,63	2,72	10,84	0,07	0,61
UV12-20	0,39	1,51	2,51	8,54	0,13	1,48

Figura 48 - A influência da adição da borracha tratada via irradiação UV por 12 horas no módulo de deformação dinâmico (MPa).



Observa-se que quanto maior a adição de borracha na mistura menor é o seu módulo dinâmico. Comparando os métodos de tratamento da borracha, nota-se que a exposição via irradiação UV por 12 horas obteve um decréscimo do valor do módulo dinâmico mais expressivo. Isso indica que o material produzido a partir deste compósito possui uma maior deformabilidade em relação às outras misturas.

Apesar das amostras tratadas com irradiação UV produzirem um material com uma maior deformabilidade, as amostras apresentam baixa resistência à compressão e à tração na flexão, o que compromete sua aplicabilidade mesmo em materiais de baixa carga.

5 Conclusões

- 1) Os resultados obtidos no estudo sobre o tratamento da borracha de pneu pela exposição à irradiação ultravioleta, mostraram que até 24 h de exposição à irradiação UV ocorreu desvulcanização da borracha. A partir de 36 h de tratamento verificou-se a formação de novas ligações, indicando a revulcanização da borracha.
- 2) De acordo com os resultados adquiridos nos ensaios mecânicos, observa-se que a substituição de mais de 15% do agregado fino (areia) pela borracha, seja ela tratada ou não, é inviável devido à queda acentuada da resistência à compressão e à tração na flexão, mesmo em aplicações de baixa carga.
- 3) Analisando a influência das amostras com e sem tratamento nas propriedades mecânicas, nota-se que a substituição da areia pela borracha, seja ela tratada ou não, provoca o decaimento da resistência à compressão e à tração na flexão. Explorando as amostras tratadas via NaOH por 30 e 40 minutos com 10% de substituição (NaOH30-10 e NaOH40-10), pode-se observar uma porcentagem de aumento na resistência à compressão (3,94% e 8,6%, respectivamente), enquanto na resistência à tração na flexão há uma porcentagem de decaimento (32% e 1,33%, respectivamente) em relação à amostra REF-B10. Essas porcentagens mostram que a influência do tratamento prévio via NaOH foi positiva na resistência à compressão.
- 4) Comparando as técnicas de tratamento prévio da borracha, pode-se observar que apesar da esperança do tratamento de UV ter influenciado a estrutura da borracha de pneu, tornando-a mais polar e em seguida melhorando as pontes de aderência com a matriz de cimento, isto não aconteceu. A resistência à compressão e à tração na flexão diminuíram drasticamente conforme o aumento do teor da borracha dentro da mistura, tornando inviável sua utilização para este propósito.

No caso do tratamento via NaOH, nota-se uma melhora na resistência à compressão para as amostras NaOH30-10, NaOH30-15, NaOH30-20, NaOH40-10, NaOH40-15 e NaOH50-5 em relação às amostras com borracha sem tratamento.

As duas técnicas aplicadas neste estudo foram baratas e de simples execução. A irradiação UV é um método mais limpo, pois não gera resíduo, como no caso

da imersão em NaOH, que é utilizado um reagente químico forte. Nesta última situação, é necessário que após o término da utilização do NaOH, essa base seja destinada corretamente para que não cause problemas ambientais.

Ainda que a geração de resíduo químico seja uma desvantagem da técnica, ela tornou-se mais eficaz, em termos de resistência à compressão, do que as amostras de borracha sem tratamento e as tratadas via irradiação UV.

Esse aumento na resistência das amostras tratadas via NaOH é justificada pelos melhores resultados obtidos na desvulcanização da borracha comparando o ensaio de ângulo de contato entre o tratamento via exposição à irradiação UV e a imersão em NaOH. A amostra que atingiu em melhores resultados foi a imersa durante 50 minutos em NaOH.

O presente trabalho iniciou-se pela escassez de pesquisas em relação ao tratamento prévio da borracha de pneu via irradiação UV, que é uma tecnologia limpa e barata. Para isso, estudou-se diversos tempos de exposição da borracha à irradiação UV e notou-se que a desvulcanização da borracha não ocorre na intensidade necessária para ser uma aplicação viável na construção civil. Já o estudo referente a desvulcanização via imersão em NaOH é mais eficaz durante 40 minutos de imersão para substituições de até 15%, pois o compósito produzido possui uma alta deformabilidade e uma resistência melhor em relação às outras misturas analisadas.

6 Sugestões de trabalhos futuros

Para futuras pesquisas seria interessante estudar mais a fundo o mecanismo de desvulcanização da borracha via NaOH nos tempos 30, 40 e 50 minutos. Para identificar as causas de mudanças significativas no comportamento das amostras com apenas 10 minutos de diferença entre elas.

Outros estudos relevantes para a pesquisa seria a flambagem para inserção de grupos oxigênio não específicos e o uso de uma dispersão de cimento (base) em comparação com o NaOH.

7 Participação em produção acadêmica

Desde o início da pesquisa até o período vigente foram realizadas as produções acadêmicas descritas a seguir.

Artigos completos publicados em periódicos

- 1) ABOELKHEIR, M. G. A. M.; THOMAS, S. ; SOUZA JR., F. G. ; TOLEDO FILHO, R. D. ; CELESTINO, R. ; THODE FILHO, S. ; DE CARVALHO, FERNANDA VELOSO ; MARANHÃO, FABÍOLA DA SILVEIRA ; PEREIRA, EMILIANE DAHER ; COSTA, V. C. ; DE LIMA, NATHALI RICARDO BARBOSA . Influence of UV-modified GTR on the properties of interlocking concrete paving units. JOURNAL OF MOLECULAR STRUCTURE, v. 1, p. 130110, 2021.
- 2) ABOELKHEIR, MOSTAFA G.; PAL, KAUSHIK ; CARDOSO, VIVIAM A. ; CELESTINO, ROBERTA ; YOSHIKAWA, NESTOR K. ; RESENDE, MAURÍCIO M. . Influence of concrete mixer washing waste water on the chemical and mechanical properties of mortars. JOURNAL OF MOLECULAR STRUCTURE, v. 1, p. 130003, 2021.

Trabalhos completos publicados em anais de congresso

- 1) ABOELKHEIR, M. G. A. M.; CELESTINO, R. ; SIQUEIRA, C. Y. S. ; SOUZA JR., F. G. ; TOLEDO FILHO, R. D. . The effect of SBR latex on the cement

- slurry hydration process. In: 62 Congresso Brasileiro do Concreto CBC2020, 2020, Florianópolis-SC. Anais do 62 Congresso Brasileiro do Concreto CBC2020. Florianópolis - SC: IBRACON, 2020.
- 2) ABOELKHEIR, M. G. A. M.; CELESTINO, R. ; SIQUEIRA, C. Y. S. ; SOUZA JR., F. G. ; TOLEDO FILHO, R. D. . Effect of SBR Latex on The Mechanical Behavior of Oil Well Cement Slurries. In: 62 Congresso Brasileiro do Concreto CBC2020, 2020, Florianópolis-SC. Anais do 62 Congresso Brasileiro do Concreto CBC2020. Florianópolis: IBRACON, 2020.
 - 3) CELESTINO, R.; ABOELKHEIR, M. G. A. M. . Recovery of Tire Rubber Waste after UV Treatment as a Recycled Aggregate in Cementitious Composites. In: 3rd International Congress on Materials & Structural Stability. Marrocos, 2021.

Resumos publicados em anais de congressos

- 1) CELESTINO, R. ; ABOELKHEIR, M. G. A. M. . Planejamento experimental da inserção de borracha de pneu em matrizes cimentícias e sua influência nas propriedades do compósito. In: 1^a Conferência Brasileira de Planejamento Experimental e Análise de Dados (ConBraPA-2020-Virtual), 2020, Virtual. Anais da 1^a Conferência Brasileira de Planejamento Experimental e Análise de Dados (ConBraPA-2020-Virtual), 2020.
- 2) CELESTINO, R. S.; ABOELKHEIR, M. G. A. M. . Agregados Reciclados: O emprego de borracha de pneu modificada na construção civil. I Seminário de Pós-Graduação Stricto Sensu Da Universidade São Judas Tadeu "Desafios para a Pós-Graduação Stricto Sensu", 2019.

Apresentação de trabalho e palestra

- 1) CELESTINO, R. S.; ABOELKHEIR, M. G. A. M. . Planejamento experimental da inserção de borracha de pneu em matrizes cimentícias e sua influência nas propriedades do compósito. 2020. (Apresentação de Trabalho/Congresso).
- 2) CELESTINO, R. S.; ABOELKHEIR, M. G. A. M. . Agregados Reciclados: O emprego de borracha de pneu modificada na construção civil. 2019. (Apresentação de Trabalho/Seminário).

8 Referências

ABOELKHEIR, M. G. et al. Biodegradation of Vulcanized SBR: A Comparison between *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa* and *Streptomyces* sp. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 19304, 17 dez. 2019.

ABOELKHEIR, M. G. et al. The Effect of Pretreated Tire Crumb on the Impact Properties of Rubberized Concrete. In: **Multidisciplinary science and advanced technologies**, jan. 2021.

ABOELKHEIR, M. G. et al. Thermo-oxidative degradation of vulcanized SBR: A comparison between ultraviolet (UV) and microwave as recovery techniques. **Journal of Polymer Research**, v. 28, n. 4, p. 141, 23 mar. 2021b.

ABOELKHEIR, M. G. et al. Influence of UV-modified GTR on the properties of interlocking concrete paving units. **Journal of Molecular Structure**, v. 1234, p. 130110, 15 jun. 2021c.

ABOELKHEIR, M. G. A. M. **PHYSICOCHEMICAL MODIFICATIONS TO GROUND TIRE RUBBER SURFACE AND THEIR IMPACT ON THE PROPERTIES OF CEMENT BASED COMPOSITES**. Rio de Janeiro: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2019.

ABPC. **Panorama do Coprocessamento**, 2019. Disponível em: <<https://coprocessamento.org.br/panorama-do-coprocessamento-brasil-2020/>>. Acesso em: 24 abr. 2021

ACSELRAD, H. Discursos da sustentabilidade urbana. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, n. 1, p. 79–79, 31 maio 1999.

ANDRADE, H. DE S. PNEUS INSERVÍVEIS: ALTERNATIVAS POSSÍVEIS DE REUTILIZAÇÃO. p. 101, 2007.

ANIP. **História do Pneu | ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos**, 2018. Disponível em: <<https://www.anip.org.br/historia-e-fabricacao/>>. Acesso em: 4 nov. 2020

ANIP. **ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos**, 2020. Disponível em: <<https://www.anip.com.br/>>. Acesso em: 24 abr. 2021

ARAÚJO, M. L. M. SUSTENTABILIDADE DAS CIDADES: ASPECTOS CONCEITUAIS. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 12, n. 0, 2006.

ARTÍÑANO, B. et al. Outdoor and indoor particle characterization from a large and uncontrolled combustion of a tire landfill. **Science of The Total Environment**, v. 593–594, p. 543–551, 1 set. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001: sistema da gestão ambiental**. Rio de Janeiro, 2004.

AZEVEDO, L. C. DE O. EFEITO ECONÔMICO DA RECICLAGEM DE PNEUS PARA A SOCIEDADE BRASILEIRA. p. 43, 2011.

BAUER, J. et al. DESTINAÇÃO DE PNEUS USADOS SERVÍVEIS E INSERVÍVEIS: DOIS ESTUDOS DE CASO Allocation of Post-Consumer Useless and Usable Tires: Two Case Study. **REVISTA ELETRÔNICA EM GESTÃO, EDUCAÇÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL**, 1 maio 2015.

BRASIL. LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. . 2010.

BROLLO, M.; SILVA, M. **POLÍTICA E GESTÃO AMBIENTAL EM RESÍDUOS SÓLIDOS. REVISÃO E ANÁLISE SOBRE A ATUAL SITUAÇÃO NO BRASIL**, jan. 2021.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos polímeros**. 3. ed. Artliber Editora, 2013.

CEH. **Styrene-Butadiene Elastomers (SBR) - Chemical Economics Handbook (CEH) | IHS Markit**. Disponível em: <<https://ihsmarkit.com/products/styrene-butadiene-elastomers-sbr-chemical-economics-handbook.html>>. Acesso em: 2 maio. 2021.

CHOU, L. H. et al. Use of waste rubber as concrete additive. **Waste Management & Research**, v. 25, n. 1, p. 68–76, 1 fev. 2007.

CIMINO, M. A.; ZANTA, V. M. Pneumatic solid waste: critical analyses of institutional actions and technologies for waste minimization. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 299–306, dez. 2005.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro: 1991.

CONAB. **Conab - História do Pneu**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuário-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-borracha-natural>>. Acesso em: 19 abr. 2021.

CORRÊA, L. R. **MONOGRAFIA SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. 2009.

COSENZA, J. P.; ANDRADE, E. M. DE; ASSUNÇÃO, G. M. DE. Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9, n. 1, p. 16147, 6 maio 2020.

COSSA, M. M.; SIRQUEIRA, A. S.; SOARES, B. G. Desenvolvimento de elastômeros termoplásticos vulcanizados (TPV) a base de polipropileno com resíduo de pneu: I - Planejamento fatorial de experimentos. **Polímeros**, v. 19, n. 3, p. 190–195, 2009.

CURY, M. V. Q. et al. **ANÁLISE SÓCIO-ECONÔMICA E AMBIENTAL PARA O USO DE ASFALTO EMBORRACHADO NA CONSTRUÇÃO DE RODOVIAS**. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/8520413-Analise-socio-economica-e-ambiental-para-o-uso-de-asfalto-emborrachado-na-construcao-de-rodovias.html>>. Acesso em: 19 abr. 2021.

DALL'ANTONIA, A. C. et al. Avaliação de clones de borracha natural crua por ensaios padrão e análise dinâmico-mecânica. **Polímeros**, v. 16, n. 3, p. 239–245, 2006.

DAMASCENA, E. S. **COPROCESSAMENTO DE PNEUS INSERVÍVEIS E SUA RELAÇÃO COM AS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DE NOX EM FÁBRICA DE CIMENTO**. Cuiabá-MT: Universidade Federal de Mato Grosso, 2018.

DANTAS, B. DE O. L. **REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DE PNEUS INSERVÍVEIS NA PAVIMENTAÇÃO**. Trabalho de Conclusão de Curso—João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2018.

ELCHALAKANI, M. High strength rubberized concrete containing silica fume for the construction of sustainable road side barriers. **Structures**, v. 1, p. 20–38, 1 fev. 2015.

ELKINGTON, J. Measuring Business Excellence. **ACCOUNTING FOR THE TRIPLE BOTTOM LINE**, v. 2, 1998.

EPELBAUM, M. **A influência da gestão ambiental na competitividade e no sucesso empresarial**. Mestrado em Engenharia de Produção—São Paulo: Universidade de São Paulo, 28 maio 2004.

ESCÓCIO, V. A. et al. Effect of ageing on mechanical and dynamic mechanical properties of natural rubber compositions with mica. **Polímeros**, v. 14, n. 1, p. 13–16, mar. 2004.

FGV. **DOSSIÊ SOBRE PNEUS**. Disponível em: <<https://direitosp.fgv.br/sites/direitogv.fgv.br/files/ap18.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2020.

FIGUEIREDO, A. Concreto com fibras. São Paulo, 2011. p. 1327–1365.

FIGUEIREDO, A. C. F. **Uma abordagem à incorporação de lenhinosulfonatos e materiais reciclados em misturas de SBR para produção sustentável de solas**. masterThesis—Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto., 2014.

FLORIANI, M. A.; CADORE FURLANETTO, V.; SEHNEM, S. Descarte sustentável de pneus inservíveis. **NAVUS - Revista de Gestão e Tecnologia**, v. 6, 2016.

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

GERGES, N. N.; ISSA, C. A.; FAWAZ, S. A. Rubber concrete: Mechanical and dynamical properties. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, p. e00184, dez. 2018.

GOLDENSTEIN, M.; ALVES, M. DE F.; BARRIOS, M. T. PANORAMA DA INDÚSTRIA DE PNEUS NO BRASIL: CICLO DE INVESTIMENTOS, NOVOS COMPETIDORES E A QUESTÃO DO DESCARTE DE PNEUS INSERVÍVEIS. p. 24, 2007.

GONÇALVES, L. B. et al. O uso da borracha enquanto um elemento que proporciona a sustentabilidade na construção civil. **Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - ALAGOAS**, v. 1, n. 1, p. 51–59, 9 maio 2014.

GONSALEZ, W. DE O.; SANTANA, R. M. C. 3º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. **TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE BORRACHA**, p. 8, 25 abr. 2012.

GOUVÊA, M. M. et al. Aplicação da radiação ultravioleta como forma de contribuição para a química verde e construção de um reator fotoquímico alternativo e de baixo custo, para pré-tratamento de amostras. **Química Nova**, v. 37, n. 2, p. 337–343, abr. 2014.

GUO, S. et al. Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 681–689, 1 abr. 2017.

GUPTA, V. K. et al. Potential of activated carbon from waste rubber tire for the adsorption of phenolics: Effect of pre-treatment conditions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 417, p. 420–430, 1 mar. 2014.

HIRAYAMA, D.; SARON, C. Revista Eletrônica de Materiais e Processos. **Moagem e desvulcanização por micro-ondas da borracha estireno-butadieno (SBR)**, v. 7.1, p. 34–38, 2012.

HU, M. et al. Biodesulfurization of vulcanized rubber by enzymes induced from *Gordonia amicalisa*. **Polymer Degradation and Stability**, v. 128, p. 8–14, 1 jun. 2016.

IRSG. **International Rubber Study Group**. Disponível em: <<http://www.rubberstudy.org/welcome>>. Acesso em: 24 abr. 2021.

JAUNICH, M.; STARK, W. Monitoring the vulcanization of rubber with ultrasound: Influence of material thickness and temperature. **Polymer Testing**, v. 28, n. 8, p. 901–906, 1 dez. 2009.

JOHN, V. M. APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO. p. 20, 2000.

KAMIMURA, E. **POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEUS PELA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL. Florianópolis, 2002.

KURZ, M. N. et al. A potencialidade do uso de resíduo de borracha de pneu em argamassa: análise das propriedades físicas e mecânicas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, 2018.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Polímeros**, v. 18, n. 2, p. 106–118, jun. 2008.

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

LEJA, K.; LEWANDOWICZ, G. Polymer Biodegradation and Biodegradable Polymers – a Review. p. 12, 2009.

- LEMOS, A. E. D. F. **ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU NO CONCRETO**. João Pessoa: Centro Universitário de João Pessoa – UNIPÊ, 2019.
- MACÊDO, A. T.; MARTINS, M. DE F. A Sustentabilidade Urbana sob a Ótica da Construção Civil: Um Estudo nas Empresas Construtoras de Campina Grande-PB. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade: GeAS**, v. 4, n. 1, p. 139–157, 2015.
- MACHIN, E. B.; PEDROSO, D. T.; DE CARVALHO, J. A. Energetic valorization of waste tires. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 306–315, 1 fev. 2017.
- MAMEDE, M. C. DOS S. **Avaliação Econômica e Ambiental do Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos no Brasil**. Campinas: Unicamp, 2013.
- MARTIN, N. B.; ARRUDA, S. T. Informações Econômicas. **A PRODUÇÃO BRASILEIRA DE BORRACHA NATURAL: SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS**, 09. v. 23, set. 1993.
- MARTINS, I. R. DE F. **Concreto de Alto Desempenho com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu**. Ilha Solteira: UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2005.
- MAVROULIDOU, M.; FIGUEIREDO, J. Discarded tyre rubber as concrete aggregate: A possible outlet for used tyres. **International Conference on Current Trends in Engineering and Technology (ICCTET)**, 2013.
- MAZZER, C.; CAVALCANTI, O. A. Infarma. **INTRODUÇÃO À GESTÃO AMBIENTAL DE RESÍDUOS**, v. 16, 2004.
- MENEGUINI, E. C. A. AVALIAÇÃO DE CONCRETO ASFÁLTICO COM INCORPORAÇÃO DE PÓ DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS, TRATADA SUPERFICIALMENTE COM HIDRÓXIDO DE SÓDIO COMERCIAL. p. 149, 2011.
- MORCELI, P. Borracha natural: Perspectiva para a safra de 2004/05. **Revista de Política Agrícola**, v. 13, n. 2, p. 56–67, 25 jun. 2015.
- MORENO, R. M. B. et al. Avaliação do látex e da borracha natural de clones de seringueira no Estado de São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 5, p. 583–590, maio 2003.
- MOTTA, F. G. A cadeia de destinação dos pneus inservíveis: o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. **Ambiente & Sociedade**, v. 11, n. 1, p. 167–184, jun. 2008.
- MOTTA, S. F. R.; AGUILAR, M. T. P. SUSTENTABILIDADE E PROCESSOS DE PROJETOS DE EDIFICAÇÕES. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 4, n. 1, p. 88–123, 30 maio 2009.
- NASCIMENTO, V. F. et al. Evolução e desafios no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 4, p. 889–902, dez. 2015.

NBR 15630. **ABNT NBR 15630 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica.** Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/5144/abnt-nbr13279-argamassa-para-assentamento-e-revestimento-de-paredes-e-tetos-determinacao-da-resistencia-a-tracao-na-flexao-e-a-compressao>>. Acesso em: 25 set. 2020.

NBR 16738. **ABNT NBR 16738 Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos,** 2019.

NUNES, A. F. **APLICAÇÃO DE ASFALTO MODIFICADO COM POLÍMEROS.** PATROCÍNIO - MG: CENTRO UNIVERSITÁRIO DO CERRADO PATROCÍNIO, 2018.

NUNES, A. T. Desvulcanização termomecânica contínua de borracha natural da banda de rodagem de pneus automotivos por meio do processo de extrusão em rosca dupla. 10 set. 2015.

NUZAIMAH, M. et al. Sodium Hydroxide Treatment of Waste Rubber Crumb and Its Effects on Properties of Unsaturated Polyester Composites. **Applied Sciences**, v. 10, n. 11, p. 3913, jan. 2020.

OLIVEIRA, M. A. DE S. et al. Influência do método de vulcanização nas propriedades mecânicas e na densidade de ligações cruzadas da borracha natural. **Polímeros**, v. 26, n. SPE, p. 43–48, 2016.

PACHECO-TORRES, R. et al. Fatigue performance of waste rubber concrete for rigid road pavements. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 539–548, 10 jul. 2018.

PAGOTO, L. M. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO À ÁGUA EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO INCORPORADAS COM BORRACHA DE PNEUS.** Ilha Solteira: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”, 2018.

PARADELA, F. M. R. **Estudo da pirólise de misturas de resíduos de plásticos, pneus e biomassa.** Doutorado em Engenharia Química e Bioquímica—Universidade Nova de Lisboa, 2012.

PAULO, G. D.; SARON, C. **RECICLAGEM DE ELASTÔMEROS POR DESVULCANIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA COMBINADAS.** p. 6, 2009.

PELISSER, F. et al. Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 6, p. 757–763, 1 abr. 2011.

PENNACCHIO, H. L. **HISTÓRICO MENSAL BORRACHA NATURAL: Borracha Natural - Análise Mensal - Março/2019.** Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-borracha-natural>>. Acesso em: 31 ago. 2020.

PICOLI, J. S.; VERISSIMO, R.; PADILHA, D. J. **Demandas Essenciais para o Avanço da Engenharia Sanitária e Ambiental 3 - Capítulo 3**. 1. ed. Atena Editora, 2020.

PISTOR, V. et al. Devulcanization of ethylene-propylene-diene polymer residues (EPDM-r) by microwaves. **Polímeros**, v. 20, n. 3, p. 165–169, set. 2010.

POURRE, O. V. **O DESTINO DOS PNEUS DESCARTADOS: Leis Vigentes e Tecnologias Utilizadas no Brasil**. Rio de Janeiro: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, abr. 2016.

PRODÓSSIMO, V. Polímero de interesse industrial: um estudo sobre a borracha. **Scientia Naturalis**, v. 3, n. 2, 25 set. 2021.

QUEIROGA, A. T. D.; MARTINS, M. DE F. INDICADORES PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL: ESTUDO EM UM CONDOMÍNIO VERTICAL EM CABEDELO, PARAÍBA. **Rev. Adm. UFSM**, 2015.

QUEK, A.; BALASUBRAMANIAN, R. Liquefaction of waste tires by pyrolysis for oil and chemicals—A review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 101, p. 1–16, 1 maio 2013.

RABELO, C. R. **ANÁLISE DE CONCRETO COM RESÍDUO DE PNEU INSERVÍVEL**. Anápolis, GO,: UniEvangélica, 2017.

RECICLANIP. **Reciclanip - O ciclo sustentável do pneu**. Disponível em: <<https://www.reciclanip.org.br/>>. Acesso em: 4 nov. 2020.

RIO+20. **COMISSÃO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – SUBCOMISSÃO RIO+20**, 2013.

RIPPEL, M. M.; BRAGANÇA, F. DO C. Natural rubber and nanocomposites with clay. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 818–826, 2009.

RODRIGUES JORGE, M. R. P.; FERREIRA, O. P.; CLARO NETO, S. ICTR 2004 – CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **APROVEITAMENTO DA BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS NA PRODUÇÃO DE COMPONENTES PARA CONSTRUÇÃO.**, p. 3692–3699, 2004.

RODRIGUES, M. R. P. **Caracterização e utilização do resíduo da borracha de pneus inservíveis em compósitos aplicáveis na construção civil**. Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental—São Carlos: Universidade de São Paulo, 29 ago. 2008.

ROMERO-SÁNCHEZ, M. D.; PASTOR-BLAS, M. M.; MARTÍN-MARTÍNEZ, J. M. Environmental friendly surface treatments of styrene–butadiene–styrene rubber: alternatives to the solvent-based halogenation treatment. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 25, n. 1, p. 19–29, fev. 2005.

ROMUALDO, A. C. A. et al. **Pneus Inservíveis como Agregados na Composição de Concreto para Calçadas de Borracha - PDF Download grátis**. Disponível em:

<<https://docplayer.com.br/931767-Pneus-inserviveis-como-agregados-na-composicao-de-concreto-para-calcadas-de-borracha.html>>. Acesso em: 29 mar. 2021.

SANTOS, H. F. DOS et al. XXXI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual: Desafios da Engenharia de Produção na Consolidação do Brasil no Cenário Econômico Mundial. **REUSO DE INSERVÍVEIS COMO UMA DAS FORMAS DE REDUÇÃO NO IMPACTO AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO REALIZADO EM UMA EMPRESA DE RECAUCHUTAGEM DE PNEUS**, out. 2011.

SANTOS, G. B. **RECÍCLAGEM DE PNEUS: VANTAGENS ECONÔMICAS E ECOLÓGICAS**. Uberlândia - MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

SCHWALM, P. C.; RANGEL, N. L. S. V.; MACIEL, G. P. DA S. Pirólise de pneus inservíveis para fins energéticos: uma revisão dos produtos de pirólise e suas aplicações. **Pirólise de pneus inservíveis para fins energéticos: uma revisão dos produtos de pirólise e suas aplicações**, v. 21, p. 101–204, 2020.

SCURACCHIO, C. H.; WAKI, D. A. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA OXIDAÇÃO DE BORRACHA DE PNEU DESVULCANIZADA POR MICROONDAS. p. 2, 2005.

SCURACCHIO, C. H.; WAKI, D. A.; BRETAS, R. E. S. Caracterização térmica e reológica de borracha de pneu desvulcanizada por microondas. **Polímeros**, v. 16, n. 1, p. 46–52, mar. 2006.

SEGRE, N.; JOEKES, I. Use of tire rubber particles as addition to cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p. 1421–1425, 1 set. 2000.

SERRANO, C. L. R. Uso de resíduo de SBR proveniente da indústria de calçados em composições de SBR. 2009.

SHU, X.; HUANG, B. Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. **Construction and Building Materials**, 1. Special Issue of KIFA-6 2. Utilization of Crumb Rubber in Asphalt Mixtures. v. 67, p. 217–224, 30 set. 2014.

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

SILVA, A. T. Estudo da desvulcanização ultrassônica de borracha de pneus inservíveis. 2015.

SILVA, L. V. DA. **OS DESAFIOS DA LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS**. Monografia—Brasília-DF: Universidade de Brasília, 2016.

SILVA, N. M. G. DA. **Caracterização dos processos de vulcanização da cortiça com borracha**. Faculdade de Ciências Universidade do Porto, 2021.

SILVA, L. S. et al. Concreto com borracha de recauchutagem de pneu para uso em pavimentação de baixo tráfego. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, 10 jun. 2019.

SILVA, M. L. C. P.; WAKI, D. A.; SCURACCHIO, C. H. ANÁLISE COMPOSICIONAL DE BORRACHA DE PNEU DESVULCANIZADA POR MICROONDAS UTILIZANDO TERMOGRAVIMETRIA. **8º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS**, 2005.

SOUZA, C. D. R.; D'AGOSTO, M. DE A. Value chain analysis applied to the scrap tire reverse logistics chain: An applied study of co-processing in the cement industry. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 78, p. 15–25, 1 set. 2013.

SOUZA, S. G. DE et al. Avaliação de diferentes formulações de compostos elastoméricos SBR/NR visando minimizar a pré-vulcanização. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 4, 2018.

THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1323–1333, 1 fev. 2016.

WILLIAMS, P. T. Pyrolysis of waste tyres: A review. **Waste Management**, v. 33, n. 8, p. 1714–1728, 1 ago. 2013.

YEMAL, J. A.; TEIXEIRA, N. O. V.; NÄÄS, I. A. Cleaner production initiatives and challenges for a sustainable world. **Journal of Cleaner Production**, v. 22, n. 1, p. I, fev. 2012.

YOUSSEF, O. et al. An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 522–532, 28 fev. 2014.

YOUSSEF, O.; MILLS, J. E.; HASSANLI, R. Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 175–183, 30 out. 2016.

ZANCHET, A. Caracterização de compósitos elastoméricos com resíduos industriais de copolímero de butadieno e estireno (SBR) desvulcanizado por micro-ondas. 23 jun. 2014.