UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

JOÃO HENRIQUE ASSUNÇÃO VIEIRA

RESÍDUO DE PNEU COMO MATRIZ DE COMPÓSITO REFORÇADO COM PÓ DE MARMORARIA, LAMA E ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

MARABÁ
2016

JOÃO HENRIQUE ASSUNÇÃO VIEIRA

RESÍDUO DE PNEU COMO MATRIZ DE COMPÓSITO REFORÇADO COM PÓ DE MARMORARIA, LAMA E ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará em cumprimento as exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador:

Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo

MARABÁ
2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA

Vieira, João Henrique Assunção
Resíduo de pneu como matriz de compósito reforçado com pó de marmoraria, lama e escoria de alto - forno / João Henrique Assunção Vieira; orientador, Adriano Alves Rabelo. — 2016.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2016.

1. Pneu - Reaproveitamento. 2. Pneu – vulcanização.3. Compósito – pneu. 3. Meio ambiente. 4. Saúde pública. I. Rabelo, Adriano Alves, orient. II. Título.

CDD: 22. ed.: 621.51

JOÃO HENRIQUE ASSUNÇÃO VIEIRA

RESÍDUO DE PNEU COMO MATRIZ DE COMPÓSITO REFORÇADO COM PÓ DE MARMORARIA, LAMA E ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará em cumprimento as exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

DATA DA AVALIAÇÃO: 27 de abril de 2016.

CONCEITO: _____.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo
(**Femat – IGE – Unifesspa – Orientador**)

_____

Prof. Dr. Elias Fagury Neto
(**Femat – IGE – Unifesspa – Membro**)

_____

Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra
(**Femat – IGE – Unifesspa – Membro**)

Aos meus pais por sempre acreditarem em mim, nos bons e maus momentos.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, pela oportunidade de realização deste curso de graduação.

Aos meus pais, Eleúza Sousa de Assunção e Antônio Alves Vieira, pelo amor, por sempre me apoiarem incondicionalmente, por terem acreditado em mim e por serem minha inspiração.

Aos meus familiares, que acreditaram na minha capacidade.

Aos docentes da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará que me apoiaram.

Aos meus colegas de turma, pelo apoio, pelos momentos de descontrações, vividos durante esses cincos anos de faculdade.

Ao Pablo Dias, pelos serviços prestado durante a realização da prática deste trabalho.

À Julliene Cristiny de Oliveira Portela, por me aconselhar, apoiar e estar ao meu lado nesta árdua jornada.

"Sabedoria para resolver e paciência para fazer".

Homero

RESUMO

A preocupação com a destinação de pneus inservíveis tem sido motivo de tema para várias pesquisas. A maior parte dos pneus inservíveis é abandonada sem o menor tratamento em lixões, cursos de água, terrenos baldios, onde estão expostos às intempéries, acumulando água e, por consequência, se tornam um grande atrativo de insetos transmissores de doenças, gerando um grave problema de saúde pública. Uma das soluções alternativas e eficientes para a destinação de pneus inservíveis é na produção de materiais compósitos, dando novas aplicações para este material, como por exemplo, blocos de calçamento. Neste trabalho foi realizado um estudo de compósitos para calçamentos utilizando o resíduo de pneu como matriz e como fase de reforço o resíduo de marmoraria, a escória de alto-forno e a lama de alto-forno. Nos materiais de reforços foram realizadas caracterizações mineralógicas e distribuições granulométricas. Os reforços foram utilizados separadamente nos compósitos nas proporções de 5%, 10% 15% e 20% em peso. A síntese dos compósitos consistiu no processo de vulcanização a 160 °C. Foram realizadas as caracterizações tecnológicas e ensaios de compressão permanente a 28 °C e 70 °C, ensaio de inchamento nos tempos de 10, 30 e 50 min e análises micrográficas por microscopia eletrônica de varredura. A utilização de lama e escória de alto-forno como carga de reforço nos teores de 5% e 10%, obteve os melhores resultados dentre os ensaios realizados, mostrando que estes compósitos podem ser aplicados em calçamentos.

Palavras-chave: Pneu inservível, compósito, vulcanização, calçamento.

ABSTRACT

The concern about the disposal of waste tires has been the subject of interest for many researches. The most of scrap tires is abandoned without any treatment in garbage dumps, waterways, wastelands, where they will be exposed to the weather, accumulating water and, therefore, become a major attraction of insect vectors of disease, causing serious public health problem. An alternative and efficient solution for the disposal of waste tires is in the production of composite materials, providing new applications for this material, such as paving blocks. In this work, a study of composites for pavements was made using tire waste as matrix and the residue of marble factory, blast furnace slag and blast furnace sludge as reinforcement phase. In reinforcements materials were carried out mineralogical characterization and particle size distribution. The reinforcements were used separately in the composite in proportions of 5%, 10% 15% and 20% by weight. The synthesis of composite consisted of the vulcanization process at 160 °C. Technological characterizations and compression set tests were carried out at 28 °C and 70 °C, swelling test in times of 10, 30 and 50 min, and micrographic analysis by scanning electron microscopy. The use of mud and blast-furnace slag as reinforcing filler in amounts of 5% and 10%, obtained the best results from the tests conducted, showing that these composites may be applied in pavements.

Keywords: Tire unserviceable, composite, vulcanization, pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Estrutura molecular do isopreno formando o polisopreno. 16
Figura 02 - Estrutura molecular da SBR. 17
Figura 03 - Esquema da formação da rede elastomérica tridimensional devido a reação de vulcanização. 18
Figura 04 - Partes que compões o pneu; (a) corte transversal; (b) pneu em imagem real..... 19
Figura 05 - Queima indiscriminada de pneus e a fumaça gerada. 22
Figura 06 - Resíduos utilizados neste trabalho: (a) RP, (b) LA, (c) EA, (d) RM. 31
Figura 07 - Fluxograma da metodologia apresentada no trabalho. 33
Figura 08 - Dispositivo utilizado para o ensaio de deformação permanente. 36
Figura 09 - Resultados das distribuições granulométrica dos resíduos. 38
Figura 10 - Resultado de difração de raios X do resíduo RM. 39
Figura 11 - Resultado de difração de raios X do resíduo EA. 39
Figura 12 - Resultado de difração de raios X do resíduo LA. 39
Figura 13 - Resultados da absorção de água. 40
Figura 14 - Resultados da porosidade aparente. 41
Figura 15 - Resultados da densidade aparente. 41
Figura 16 - Resultados do ensaio de Deformação permanente a 28 °C. 42
Figura 17 - Resultados do ensaio de Deformação permanente a 70°C. 43
Figura 18 - Resultados do ensaio de inchamento utilizando o resíduo RM. 44
Figura 19 - Resultados do ensaio de inchamento utilizando o resíduo EA. 44
Figura 20 - Resultados do ensaio de inchamento utilizando o resíduo LA. 45
Figura 21 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura da amostra sem reforço. 45
Figura 22 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 5% de RM. 46
Figura 23 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 10% de RM. 46
Figura 24 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 15% de RM. 46
Figura 25 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 20% de RM. 46
Figura 26 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 5% de EA. 47
Figura 27 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 10% de EA. 47
Figura 28 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 15% de EA. 47
Figura 29 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 20% de EA. 47
Figura 30 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 5% de LA. 48
Figura 31 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 10% de LA. 48
Figura 32 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 15% de LA. 48
Figura 33 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 20% de LA. 48

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Composição química média de um pneu. 19
Tabela 02 - Composição química dos resíduos RM, EA e LA. 32
Tabela 03 - Formulações estudadas. 32

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AA	Absorção de água
Dap	Densidade aparente
DRX	Difração de raios X
EA	Escória de Alto-forno
FRX	Fluorescência de raios X
L	Densidade do líquido usado na temperatura do ambiente
LA	Lama de Alto-forno
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
Mi	Peso da amostra após o inchamento
Mp	Peso da amostra antes do inchamento
NR	Borracha natural
PA	Porosidade aparente
Pi	Peso do corpo de prova imerso
Ps	Peso do corpo de prova seco
Pu	Peso do corpo de prova úmido
RM	Resíduo de marmoraria
RP	Resíduo de pneu
S	Grau de inchamento
SBR	*Styrene-Butadiene Rubber*
M_h	Massa do material submetido ao peneiramento fino
M_i	Massa do material retido acumulado em cada peneira
Q_f	Porcentagem de material passado em cada peneira
c_B	Deformação permanente
t_0	Espessura original do corpo de prova;
t_i	Espessura final do corpo de prova
t_n	Abertura do dispositivo de compressão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
2. OBJETIVOS 14
2.1. OBJETIVO GERAL 14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 14
3. REFERENCIAL TEÓRICO 15
3.1. BORRACHA 15
3.1.1. Borracha natural 15
3.1.2. Borracha sintética 16
3.2. PROCESSO DE VULCANIZAÇÃO 17
3.3. PNEUS E SUA COMPOSIÇÃO 19
3.4. PROBLEMAS CAUSADOS PELA DESTINAÇÃO INCORRETA DE PNEUS 22
3.5. APLICAÇÕES MAIS COMUNS PARA PNEUS INSERVÍVEIS 23
3.6. RESÍDUOS SÓLIDOS 24
3.6.1. Resíduo de marmoraria 24
3.6.2. Escória de alto-forno 25
3.6.3. Lama de alto-forno 26
3.7. COMPÓSITOS 26
3.7.1. Compósitos elastoméricos com resíduos de SBR da indústria calçadista 27
3.7.2. Compósitos híbridos de borracha nitrílica, fibras de sisal e carbonato de cálcio. 28
3.7.3. Compósito de borracha natural proveniente da Guayule reforçado com microfibras de celulose 29
3.8. CALÇAMENTO DE BORRACHA A PARTIR DE PNEUS. 29
4. MATERIAIS E MÉTODOS 31
4.1. MATERIAIS 31
4.2. METODOLOGIA 32
4.2.1. Análises granulométricas 33
4.2.2. Caracterização mineralógica 34
4.2.3. Análise das características físicas 34
4.2.4. Deformação permanente por compressão 35
4.2.5. Ensaio de inchamento 36
4.2.6. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 37

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 38
6. CONCLUSÕES..... 49
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 50
REFERÊNCIAS 51

1. INTRODUÇÃO

O pneu transformou-se em um utensílio indispensável e fundamental para a sociedade moderna, por agilizar, dar comodidade e segurança no transporte de cargas e passageiros, desta forma nas últimas décadas a demanda mundial vem crescendo abruptamente. Porém, a maior parte destes pneus inservível após seu uso estão abandonados sem o menor tratamento em lixões, aterros, cursos de água, terrenos baldios, onde estarão expostos às intempéries, acumulando água e, desta forma, se tornam um grande atrativo de insetos transmissores de doenças, gerando um grave problema de saúde pública.[1]

Diante disso, vários métodos para a destinação ambientalmente correta estão sendo desenvolvidos para buscar resolver o problema dos pneus inservíveis. Uma das formas consiste na separação da borracha de outros componentes como, por exemplo, metais e tecidos. Os pneus são cortados em lascas e purificados por um sistema de peneiras. O material que resulta desse processo tem como utilidade, cobrir áreas de lazer e quadras esportivas, fabricar tapetes para automóveis, saltos e solados de sapatos, rodos domésticos, buchas para eixos de caminhões e ônibus, entre outras como a produção de calçamentos.[2]

O calçamento de concreto não permite que o ar e a água passem para o solo por isso, as raízes crescem para cima, em busca de alimento, e acabam empurrando e quebrando a calçada. A utilização de calçamento de borracha a partir do pneu, permitir a passagem de ar e de água, proporciona um conforto melhor durante uma caminhada e tem uma durabilidade maior que o calçamento de concreto. Além de tudo, para cada metro quadrado de calçamento de borracha significa menos pneus jogados nos lixões.[3]

Neste trabalho foi realizado um estudo de compósitos para calçamento de borracha a partir de pneu inservível, utilizando como carga de reforço resíduos industriais, os quais também geram grandes problemas para o meio ambiente.

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo propor uma destinação alternativa para os resíduos de pneus, que atualmente estão em sua maioria abandonados em lixões, tornando-se um grande problema ambiental. E assim, estudar materiais compósitos para calçamentos utilizando como matriz o resíduo de pneu e como fase de reforço o resíduo de marmoraria, a escória de alto-forno e a lama de alto-forno.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Análise da distribuição granulométrica dos resíduos de pneu, marmoraria, escória e lama de alto-forno.
- ✓ Caracterização mineralógica dos resíduos de marmoraria, escória e lama de alto-forno. (DRX);
- ✓ Preparação das formulações por meio do processo de vulcanização e determinação das propriedades físicas;
- ✓ Determinação do grau das ligações por meio do ensaio de inchamento;
- ✓ Análise da deformação permanente por meio ensaio de *deformação permanente*;
- ✓ Análise da interação carga - matriz através do MEV.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. BORRACHA

As borrachas ou elastómeros são materiais poliméricos que se distinguem pela característica única de permitir grandes alongamentos em pelo menos duas vezes seu tamanho e retornar rapidamente à forma e à dimensão originais, quando submetidos a um esforço ou deformação externa, especialmente quando se encontram vulcanizadas. A borracha é um material considerado de importância estratégica, devido ao papel que desempenha principalmente no transporte de pessoas, matéria-prima, produtos acabados, alimentos, etc.[4]

As borrachas são polímeros com alto peso molecular, formados por longas cadeias de emaranhados de macromoléculas sendo essas compostas por uma sequência repetitiva de um ou mais tipos de monômeros. As borrachas são classificadas como naturais e sintéticas.[4,5] A maior parte da borracha produzida industrialmente é usada na fabricação de pneus, correspondendo a 70% da produção.

3.1.1. Borracha natural

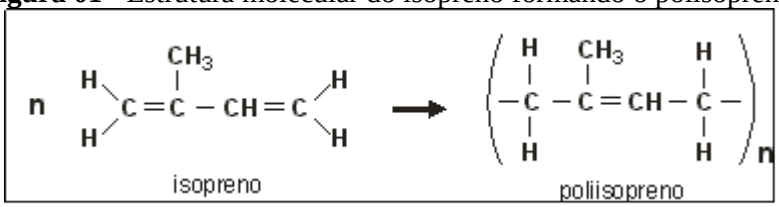
A borracha natural (NR), se refere a um cis-coagulado ou produto precipitado do poliisopreno, obtido a partir da produção de látex de plantas. Moléculas de borracha são sintetizadas no citoplasma das células vegetais Os precursores isoprenóides de borracha são sintetizados no citosol. A atividade cis da molécula de borracha aumenta progressivamente para formar um biopolímero. Os comprimentos dos biopolímeros resultantes determinam o peso molecular da borracha.[5]

Numerosas espécies botânicas, espalhas pelo mundo produzem borracha, porém a única espécie que gera borracha de alta qualidade e em condições econômicas é a Hevea brasiliensis, a seringueira.[4]

O látex é constituído por substâncias tais como proteínas, lipídios, aminoácidos, água, hidrocarbonetos, entre outros. E apresenta massa molar média de 600.000 a 950.000 g/mol.[6,7]

A borracha natural é constituída por unidades repetitivas do isopreno, se ligam por meio de ligações por meio dos átomos de carbono (1 e 4) num arranjo cabeça-calda, formando uma configuração cis, ou seja, os grupos laterais encontram-se todos no mesmo lado da cadeia, a Figura 01 apresenta a estrutura molecular de isopreno formando o polisopreno. A regularidade micro-estrutural exerce importante papel sobre as propriedades da borracha natural, tais como elasticidade e deformação.

Figura 01 - Estrutura molecular do isopreno formando o polisopreno.



Fonte: (6).

A RN possui desvantagens como ser perecível, por estar misturada a outras substâncias que não são a borracha e além de ser pegajosa e sensível a temperatura. Para melhorar as suas propriedades dentro das aplicações desejadas, após a coagulação e secagem, deve-se proceder à adição de cargas e aditivos homogeneamente na matriz e então realizar o processo de vulcanização.[6]

As principais cargas e aditivos empregados são o enxofre, óxido de zinco, ácido esteárico, aceleradores orgânicos, anti-ozonantes e antioxidantes, agentes de fluxo. As características principais da borracha natural são a elasticidade, resistência à abrasão, resistência a abrasão (desgaste); impermeabilidade; facilidade a adesão em tecidos e aço e resistência a produtos químicos, plasticidade, condutividade elétrica muito baixa e muitas outras que a fazem entrar na fabricação de inúmeros e variados itens.[6]

3.1.2. Borracha sintética

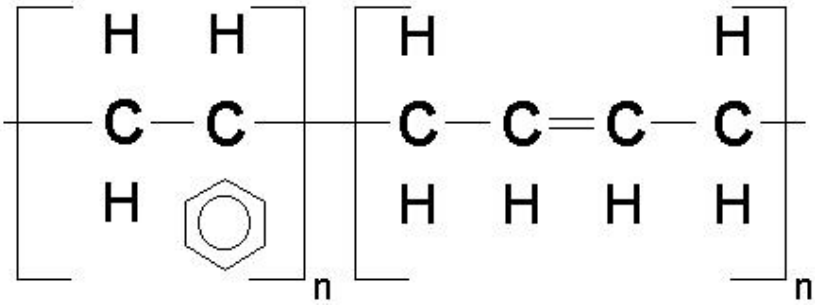
Como o aumento da importância da borracha na civilização moderna, surgiu a necessidade da descoberta da composição e síntese da borracha. A borracha sintética pode ser produzida a partir da polimerização de uma variedade de monômeros derivados do petróleo ou do álcool, que podem ser misturados em várias proporções desejáveis para uma ampla gama de propriedades físicas, mecânicas e químicas. O copolímero de estireno e butadieno é a borracha sintética (SBR) que mais se expandiu no mundo. Ao lado da borracha natural, divide cerca de 70 a 75% do mercado mundial das borrachas.[6]

A borracha SBR surgiu na década de 1930, na Alemanha, com o nome de Buna S. Esse produto ainda era considerado de baixa qualidade se comparado com a NR, porém, o avanço da tecnologia serviu de base para a produção nos Estados Unidos na década seguinte (1940). Foi então desenvolvido e produzido em grande escala durante a Segunda Guerra Mundial, recebendo a denominação de GRS (*Government Rubber- Styrene*), sendo esse nome substituído por SBR (*Styrene-Butadiene Rubber*).[6]

Essas borrachas podem ser produzidas por dois diferentes métodos de polimerização: emulsão ou solução. A principal diferença entre a SBR produzida por emulsão e a por

solução, é em relação à linearidade e distribuição da massa molar. O elastômero SBR produzido por emulsão apresenta uma distribuição de massa molar maior e um alto grau de ramificação, fatores que facilitam o seu processo de produção, a Figura 02 mostra a estrutura molecular da SBR. [8,9]

Figura 02 - Estrutura molecular da SBR.



Fonte: (10).

A borracha sintética possui muitas propriedades indesejáveis e não pode substituir totalmente a borracha natural em várias aplicações de alto desempenho que exigem propriedades como alta resistência à tração e resistência à abrasão.[11] Mas em muitos casos ela pode substituir a borracha natural já que resiste melhor ao envelhecimento e às rachaduras do que a borracha natural. Atualmente ainda não se conseguiu produzir a borracha sintética exatamente igual à borracha natural.[12]

3.2. PROCESSO DE VULCANIZAÇÃO

Cerca de 150 anos atrás, Goodyear, nos Estados Unidos, Hancock na Inglaterra, descobriram que a borracha da Índia poderia ser alterada por aquecimento com enxofre e pressão. Com isso, a borracha não era muito afetada pelo calor, frio, e solventes. Este processo foi denominado “vulcanização", resultantes da associação de calor e enxofre como Vulcan da mitologia.[13]

Vulcanização é o processo químico em que a borracha diminui sua plasticidade, espessura e sensibilidade ao frio e ao calor e lhe confere uma serie de propriedades como elasticidade, estabilidade e resistência. E somente acontece em polímeros ou macromoléculas que possuam instaurações, formando uma rede tridimensional elástica devido as ligações covalente cruzadas. Um emaranhamento de longas cadeias moleculares e convertido em redes tridimensionais por ligações cruzadas entre as moléculas em vários pontos, ao longo das cadeias.[13,14]

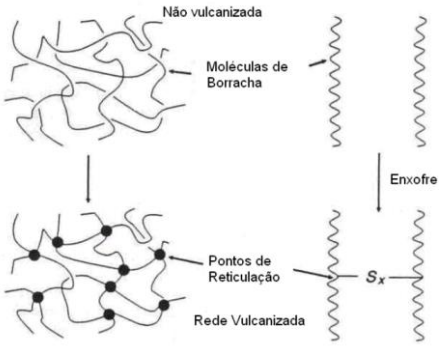
Nas borrachas, após a reação de vulcanização, aparece mais um grupo energético de extremo potencial, a energia de encadeamento. Este grupo soma-se as ligações

intermoleculares numa formação tridimensional, intensificando sobremaneira o potencial das ligações estruturais intermoleculares, o que proporciona aos artefatos vulcanizados propriedades técnicas excepcionais.[15]

O principal e mais antigo agente de vulcanização é o enxofre. A grande maioria dos sistemas de cura em uso na atualidade envolve ligações cruzadas contendo enxofre, geralmente com o elemento enxofre combinado a algum acelerador orgânico. Outros sistemas de cura menos usados incluem resinas como as resorcinol-formaldeido, uretanos e peróxidos.[16]

As cadeias poliméricas são unidas quimicamente por uma ligação sulfídica, ou seja, o átomo de enxofre promove ligações entre cadeias através de uma ligação química de cada uma delas a ele, em pontos de instauração nas cadeias. A Figura 03 apresenta de forma esquemática modificação física que ocorre no elastômero durante a reação de vulcanização, devido a formação de uma rede tridimensional[14]. O enxofre é o agente de vulcanização mais preferido por ter um ajuste mais simples entre o início da vulcanização e o patamar de vulcanização, Maior flexibilidade na composição, possibilidade de vulcanização por ar quente, melhores propriedades mecânicas e por ter maior economia.[17]

Figura 03 - Esquema da formação da rede elastomérica tridimensional devido a reação de vulcanização.



Fonte: (13).

A determinação exata do método e das condições de vulcanização, isto é, tempo, temperatura e pressão, devem ser feitas não só tendo em vista a composição empregada, mas como também as dimensões do artefato a ser fabricado e sua aplicação.

Existem vários sistemas de vulcanização como túnel de ar quente, onde o material da extrusora passa e como o ar aquecido possui transmissão de calor muito baixa, é necessário que os túneis sejam longos, os sistemas de vapor, onde ocorre vulcanização contínua por tubo ou uma câmara de vapor ou gases tais como gás sulfuroso (SO_2) e o gás sulfídrico (SH_2), muito usado na indústria de condutores elétricos e o mais comum que é o sistema de prensas

com platôs aquecidos por vapor, eletricidade ou fluídos que entram em contato com o molde. Quanto maior a temperatura, mais rápida é a vulcanização.[12]

3.3.PNEUS E SUA COMPOSIÇÃO

O pneu é um produto essencial à segurança dos usuários, garantindo melhor desempenho, estabilidade e performance dos veículos. É fabricado para atender os hábitos de consumo, assim como as condições climáticas e as características do sistema viário existente em cada país.[18]

Um pneu é formado pela disposição de vários materiais sobrepostos que posteriormente a sua montagem, passando pelo processo de vulcanização. A Figura 04 resume as partes básicas de um pneu.

Figura 04 - Partes que compões o pneu; (a) corte transversal; (b) pneu em imagem real.

Fonte: (19).

Os pneumáticos têm em sua composição materiais como borracha natural, borracha sintética, aço, lonas de nylon, substancias químicas para catálise e aumento da resistência e etc., de acordo com a Tabela 01.

Tabela 01 - Composição química média de um pneu.

Composto / Elemento	Quantidade (%)
Carbono	70,0
Hidrogênio	7,0
Óxido de Zinco	1,2
Enxofre	1,3
Ferro	15,0
Outros	5,5

Fonte: (20).

A seguir, a listagem das principais partes componentes na montagem de pneus e suas devidas funções.

Banda de rodagem – A banda de rodagem é a parte fica em contato direto com o chão. Ela é dividida em três partes: os sulcos, as ranhuras e as barras.

Sulcos (drenos) – A função dos sulcos é drenar a água, evitar deslizamentos e refrigerar os pneus. Alguns possuem mais sulcos que outros, o que significa que são mais aderentes, especialmente em dias de chuva.

Ranhuras – É por elas que o ar passa para refrigerar a borracha do pneu. As ranhuras também são responsáveis por diminuir a ressonância.

Barras – As barras geram a tração e são a parte em contato com o solo. A barra do pneu é diretamente ligada à potência.

Talão – Quando se fala em pneus, se lembra muito de borracha. Mas na estrutura do pneu há peças até de aço, que é o caso dos talões. Localizados nas duas extremidades, eles são fios de aço cobertos por cobre, que tem como função a fixação do pneu na roda.

Estanque – Basicamente, o estanque é a parte interna que substitui a câmera nos pneus radiais.

Lonas de reforço – São fios de poliéster que reforçam a estrutura da carcaça do pneu.

Cintas estabilizadoras – Também formadas por fios de aço, fazem parte da estrutura e da carcaça. As cintas fazem com que o pneu tenha mais contato com o solo, e assim tornem o carro mais estável. Elas também evitam que objetos perfurem a carcaça. Pneus para veículos que atingem velocidades mais altas possuem uma segunda cinta.

Lateral – A parte lateral do pneu é a responsável pelo conforto. Quanto mais fino for o pneu, menos confortável ele será para o motorista. A lateral é flexionada cerca de 800 vezes por segundo enquanto o carro roda, e por isso tem tanta importância.

Ombro – A estabilidade do veículo também está ligada ao ombro dos pneus, que trabalham principalmente nas curvas.

Nota-se o grande desafio ambiental que se tem em mãos no que tange a questão do descarte final dos pneus pelo alto grau de complexidade da composição dos mesmos, uma vez que diariamente são fabricados e ao mesmo tempo descartados milhões de pneus no mundo, além disso, um pneu descartado na natureza leva em torno de 600 anos para decompor. [21]

A prática da reforma de pneus colabora em muito para a minimização dos impactos associados à fase de descarte final do pneu automotivo; além disso, “o pneu reformado permite minimizar custos de manutenção de frotas de veículos devido ao menor custo desse

pneu em comparação aos novos", e também economia de matérias-primas obtidas através do petróleo e energia elétrica utilizadas na confecção de novos pneus.[22]

No entanto, é importante ressaltar que nem todos os pneus podem passar pelo processo de reforma. Para que isso ocorra é necessário que a estrutura do pneu deva estar intacta para que ele cumpra sua função original quando for reutilizado, além disso, a questão da segurança não deve estar comprometida.[22] Os processos industriais existentes para a reforma de pneus são:

Recapagem: É a reconstrução de um pneu através da substituição de sua banda de rodagem. No setor de recapagens proporciona ao Brasil uma economia de 180 milhões de dólares por ano. Segundo a associação brasileira de recapagem, além de economia monetária, a recapagem de pneus reduz o consumo de recursos naturais, evitando que se gaste, em média, 57 litros de petróleo com a fabricação de um novo, e reduzindo o consumo de energia elétrica em até 80%. Uma recapagem dobra a vida do pneu e dependendo da utilização, um pneu pode ser recapado mais de uma vez. [23]

Recauchutagem: É a reconstrução do pneu através da substituição da banda de rodagem e dos ombros. Consiste na remoção da banda de rodagem desgastada da carcaça do pneu para que através de um novo processo de vulcanização se coloque uma nova banda de rodagem. É importante frisar que o pneu para ser recauchutado deve apresentar requisitos tais como: ausência de cortes e deformações e que a banda de rodagem não esteja totalmente desgastada, que ainda apresente os sulcos responsáveis pela aderência do pneu ao solo. Além disso, ele poderá ser recauchutado no máximo cinco vezes, depois disso o pneu tem seu desempenho prejudicado. [22]

Remoldagem: É outro processo de reutilização dos pneus classificados como reformáveis, sendo reconstruído o pneu através da substituição da banda de rodagem e, dos ombros e de toda a superfície dos seus flancos, conforme está determinado na Resolução CONAMA 258/99[22]. A remoldagem é um processo que se assemelha à recauchutagem, a diferença se dá em função da remoção da banda de rodagem e das partes laterais dos pneus, sendo assim, todo pneu recebe uma nova camada de borracha e passa por um novo processo de vulcanização. "Os pneus remoldados pelo fato de utilizarem carcaças usadas como matéria-prima, não são pneus novos, mas sim novos produtos feitos a partir de pneus usados."[24]

3.4. PROBLEMAS CAUSADOS PELA DESTINAÇÃO INCORRETA DE PNEUS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, por meio da NBR 10.004/2004, classifica os resíduos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, indicando quais devem ter manuseio e destinação mais rigorosamente controlados. Os resíduos são classificados da seguinte forma:[25] Classe I: perigosos, Classe II: não perigosos, Classe II A: não inertes, Classe II B: inertes.

Os pneus são classificados como Classe II A – não inertes, por apresentarem teores de metais (zinco e manganês) no extrato solubilizado superiores aos padrões estabelecidos pela NBR 10.004/2004.[26]

De acordo com o art. 15 da Resolução CONAMA 416/09, é vedada a destinação final de pneus no meio ambiente, tais como o abandono ou lançamento em corpos d'água, terrenos baldios ou alagadiços, a disposição em aterros sanitários e a queima a céu aberto.[27]

A queima dos pneus também representa uma ameaça de contaminação ao solo e aos lençóis freáticos, uma vez que os produtos químicos tóxicos e os metais pesados liberados pelo pneu em sua combustão podem durar até 100 anos no meio ambiente. [28]

A fumaça gerada pela queima, se lançada sem nenhum tipo de tratamento ou filtragem, libera substâncias altamente tóxicas, que podem representar riscos de mortalidade prematura, deterioração das funções pulmonares, problemas do coração, depressão do sistema nervoso e central. [29] A Figura 05 mostra o grande volume de fumaça tóxica emitida na queima de pneus.

Figura 05 - Queima indiscriminada de pneus e a fumaça gerada.

Fonte: (19).

Muitas vezes os pneus são jogados em córregos, lagos ou rios, o que provoca a diminuição da calha desses locais que consequentemente ficam mais passíveis a enchentes,

causando inundações às vias e residências próximas, além das doenças eminentes a este tipo de situação.

Vários estudos já comprovaram que a queima a céu aberto, independentemente da quantidade, gera emissões com um efeito mutagênico. Os pneus inteiros, como provocam taxas de combustão superiores quando comparados aos pneus triturados, geram emissões orgânicas mais elevadas.[30]

Não é recomendada a disposição de pneus inservíveis em aterros sanitários devido a sua forma e composição, dificuldade de compactação, decomposição e redução na vida útil do aterro. Os pneus podem reter ar e gases em seu interior, fazendo com que o pneu tenda a ir para a superfície do aterro (como um balão) quebrando, assim, a camada de cobertura. Com uma rachadura nessa camada, os resíduos se tornam expostos, novamente atraindo insetos, roedores e pássaros, e permitem que os gases escapem sem controle.

Além disso, é um caminho, também, para que a água das chuvas entre, produzindo uma quantidade maior de chorume. Uma vez na superfície, tornam-se vetores de proliferação de insetos transmissores de doença tropicais – com destaque ao Aedes aegypti, transmissor da dengue, doença endêmica no Brasil e ambiente propício para proliferação de roedores que, entre inúmeras doenças, transmitem a leptospirose.[28]

3.5. APLICAÇÕES MAIS COMUNS PARA PNEUS INSERVÍVEIS

O pneu que não tem mais condições de reforma é chamado de pneu inservível. Tendo em vista que os pneus inservíveis são um dos resíduos que prejudicam o meio ambiente, fabricantes e importadores têm o dever civil de destiná-los adequadamente. Estes pneus descartados podem ser reciclados ou reutilizados para diversos fins. Neste caso, são apresentadas, a seguir, algumas opções:[31]

Na engenharia civil*:* O uso de grânulos de borracha na engenharia civil envolve diversas soluções criativas, em aplicações bastante diversificadas, tais como, amortecedor de campos de futebol com grama sintética, pistas de atletismo, pisos de academia de ginástica, elemento de construção em parques e playgrounds, quebra-mar, obstáculos para trânsito e, até mesmo, recifes artificiais para criação de peixes. [31]

Na regeneração da borracha*:* O processo de regeneração de borracha envolve a separação da borracha vulcanizada dos demais componentes e sua digestão com vapor e produtos químicos, tais como, álcalis, mercaptanas e óleos minerais. O produto desta digestão é refinado em moinhos até a obtenção de uma manta uniforme, ou extrudado para obtenção de

material granulado. A moagem do pneu em partículas finas permite o uso direto do resíduo de borracha em aplicações similares às da borracha regenerada. [31]

Na geração de energia*:* O poder calorífico de pedaços ou grânulos de pneu equivale ao do óleo combustível, ficando em torno de 40 MJ/kg. O poder calorífico da madeira é por volta de 14 MJ/kg. Os pneus podem ser queimados em fornos já projetados para otimizar a queima. Em fábricas de cimento, sua queima já é uma realidade em outros países. [31]

No asfalto modificado com borracha*:* O processo envolve a incorporação da borracha em grânulos ou em pó. Apesar do maior custo, a adição de pneus no pavimento pode até dobrar a vida útil da estrada, porque a borracha confere ao pavimento maiores propriedades de elasticidade diante das constantes mudanças de temperatura. O uso da borracha também reduz o ruído causado pelo contato dos veículos com a estrada. [31]

Reutilização do Aço*:* O aço é retirado como sucata dos pneus velhos e vendidos e destinado a aciarias, sendo reutilizados para outros fins.

3.6. RESÍDUOS SÓLIDOS

Resíduo é considerado qualquer material que sobra de processos produtivos ou ações e este por variar como o tempo e o espaço, uma vez que este num determinado momento pode adquirir um certo valor. Os resíduos podem ser de diversos tipos gerados nos processos de extração mineral, transformações ou consumo de produtos e serviços. Esses resíduos passam a ser descartados e acumulados no meio ambiente causando não somente problemas de poluição, como caracterizando um desperdício da matéria originalmente utilizada. Os resíduos industriais se definem como quaisquer materiais sólidos, pastosos ou líquidos, resultantes de processos industriais como de fabricação, transformação, utilização, consumo ou limpeza, cujo produtor ou possuidor destina-o ao abandono. Devido às características peculiares, esses resíduos geralmente não podem ser lançados na rede de esgoto ou em corpos de água.[32]

3.6.1. Resíduo de marmoraria

O Brasil é um dos grandes produtores de rochas ornamentais do mercado mundial, sendo responsável pela produção de, aproximadamente, 600 tipos de rochas comerciais, derivadas de quase 1500 jazidas, que são geridas por cerca de 300 empresas mineradoras. Só no beneficiamento de granitos e mármores, cerca de 250 empresas administram mais de 1500 teares, com capacidade produtiva de 40 milhões de m²/ano.[33]

Durante o processo de desdobramento dos blocos de granito, quando se faz a serragem e o polimento, há uma geração significativa de resíduos. Estimam-se que para

produzir chapas de 2 cm de espessura, 20% a 25% do bloco é transformado em pó. No Brasil existem muitas empresas de beneficiamento de mármore, portanto gerando uma quantidade de resíduo durante o corte de mármore e granito seja de 240.000 Ton/ano. Devido a essa grande quantidade de resíduo gerado, novas aplicações para o resíduo tendo sido objetivo de algumas pesquisas como o aproveitamento do resíduo.[33]

Este resíduo é um pó gerado pelas empresas de beneficiamento de rochas ornamentais, especificamente, gerado no polimento, com o auxílio do equipamento denominado Politriz. O polimento das placas ocorre em meio aquoso e gera uma lama densa com partículas extremamente reduzidas. Após a secagem, o resíduo torna-se um pó de cor cinza, com tonalidades variadas, dependendo do tipo do granito rocha a ser beneficiado.[33]

3.6.2. Escória de alto-forno

A escória pode ser definida como "Um produto não-metálico constituído essencialmente de silicato de cálcio e outras bases que se desenvolve no forno durante o processo de fusão do ferro".[33]

Os princípios constituintes da escória de ferro são: silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), que representam 95% da composição desse material. Elementos secundários como óxidos de manganês e ferro também fazem parte da composição.[33]

As características físicas como densidade, porosidade e tamanho da partícula dependem do tipo de resfriamento da escória e de sua composição química. Outro fator importante é o poder aglomerante da escória, que depende da relação entre a quantidade dos compostos SiO2, CaO e MgO presentes na escória. Este poder aglomerante é definido como reatividade hidráulica.[33]

A reatividade hidráulica depende da composição química, fase vítrea do resíduo e da granulometria do grão da escória. Este índice de hidraulicidade ou módulo de basicidade pode ser calculado pela equação 01:

$$F1 = \frac{CaO}{SiO_2} \qquad (01)$$

Onde,

Se F1< 1, a escória é considerada ácida e sua hidraulicidade é baixa.

Se F1 > 1,a escória é considerada básica e sua hidraulicidade é boa.

Neste caso, pode-se ter os seguintes tipos de escória:

- **Escória granulada**: é obtida através do processo, onde a escória é resfriada de forma rápida através de jato d'água. Nesse processo não há tempo para cristalização do material.

- **Escória pelotizada*:*** é obtida quando a escória cai dentro de uma roda dentada onde também é submetida a um jato d'água, que arremessa a escória em grãos para o ar.

- **Escória cristalizada**: é o tipo de escória que é obtida pelo processo mais simples, ela escorre por um canal no alto forno e então se resfria naturalmente de forma lenta até cristalizar por completo, originando-se uma pedra bruta e maciça.[33]

3.6.3. Lama de alto-forno

A lama de alto-forno é o co-produto gerado após a etapa de lavagem do gás de alto-forno e a separação dos particulados sólidos, na forma de lama, da água. Os resíduos têm aparência de um pó escuro depois de desidratados, e são depositados em áreas controladas ou reutilizados.[34]

A composição química das lamas da ArcelorMittal Brasil, COSIPA e Ensidesa apresentam substâncias que são geradas a partir das reações químicas ocorridas no interior do alto-forno, principalmente óxido de ferro e carbono. A lama originária da Espanha é formada principalmente por substâncias heterogêneas, principalmente a hematita (Fe_2O_3) e carbono, com menores quantidades de wustita (FeO), magnetita (Fe_3O_4), maghetita (Fe_2O_3), ferrite de cálcio ($CaO.Fe_2O_3$), quartzo (SiO_2), cálcio (Ca) e alumino-silicatos.[34]

O alto teor de hematita e de carbono encontrado é devido ao carreamento de partículas geradas pelo processo de redução devido ao fluxo ascendente de gases contra a corrente no interior do alto-forno. Quimicamente, a lama de alto-forno é composta de carbono e ferro refletindo no processo de produção de aço, além de metais que causam danos ambientais que incluir As, Zn, Pb e Cd.[34]

3.7. COMPÓSITOS

As tecnologias modernas exigem materiais com combinações de propriedades em muitos casos antagônicas, como por exemplo: alta resistência mecânica combinado com baixa massa específica ou alta rigidez combinada com resistência ao impacto. Combinações essas que não podem ser atendidas pelas ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos convencionais isoladamente. As combinações e as faixas das propriedades dos materiais foram, e ainda estão sendo ampliadas através do desenvolvimento de materiais compósitos. Um compósito pode ser como qualquer material multifásico que exibe uma proporção

significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades.[35]

Os materiais que compõem um material compósito podem ser classificados em dois tipos, matriz e reforço. Na matriz confere-se estrutura ao material compósito que é continua e envolve a outra fase, preenchendo os espaços vazios que ficam entre os materiais reforços e mantendo-os em suas posições relativas. Já os reforços ou fase dispersa são os que realçam propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas do material compósito como um todo.[35, 36]

Os compósitos reforçados com partículas em sua maioria a fase particulada são mais duros e mais rígidos do que a matriz. Essas partículas de reforço tendem a restringir o movimento da fase matriz na vizinhança de cada partícula. Essencialmente, a matriz transfere parte da tensão aplicada às partículas, as quais suportam uma fração da carga. O grau de reforço ou melhoria do comportamento mecânico depende de uma ligação forte na interface matriz-partícula.[37]

As interações partícula-matriz que levam ao aumento de resistência ocorrem no nível atômico ou no nível molecular. O mecanismo de aumento de resistência é semelhante àquele para o processo de endurecimento por precipitação. Enquanto a matriz suporta a maior parte de uma carga que é aplicada, as pequenas partículas dispersas evitam ou dificultam o movimento de discordâncias. Dessa forma, a deformação plástica é restringida de modo a tal que o limite de escoamento e o limite de resistência à tração, bem como a dureza são melhorados.[35]

Dentre os compósitos têm-se os de matriz elastomérica ou borrachosa, os quais estão sendo tema de vários estudos, voltados principalmente para o reaproveitamento de resíduo de borracha. A seguir são apresentados alguns estudos desenvolvidos utilizando matriz borrachosa.

3.7.1. Compósitos elastoméricos com resíduos de SBR da indústria calçadista

Pó de borracha reciclado tem sido reconhecido como um material de valor e que pode ser reutilizado no processamento de elastômeros. A mistura desse pó em borracha virgem e sua subsequente vulcanização têm expandido as aplicações da borracha reciclada na produção de novos artefatos.[38]

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho tratou de avaliar a influência do resíduo de poli(butadieno-co-estireno) (SBR-r) em compósitos vulcanizados contendo SBR

virgem. O teor incorporado de SBR-r variou de 0 a 30 pcr (partes por cem de elastômero). Os compósitos foram preparados com e sem a adição de 10 pcr de óleo aromático.[38]

Os resultados mostraram que o aumento do teor de SBR-r no compósito promoveu uma maior reticulação do material. O óleo tornou os compósitos mais flexíveis e com menor densidade de ligações cruzadas. A incorporação de 20 pcr de SBR-r implicou em aumento nas propriedades mecânicas para os compósitos, sendo este o limite máximo a ser adicionado sem perdas significativas de propriedades.[38]

3.7.2. Compósitos híbridos de borracha nitrílica, fibras de sisal e carbonato de cálcio.

A obtenção de compósitos elastoméricos resistentes a óleos e à abrasão, com propriedades mecânicas melhoradas através da incorporação de fibras naturais pelo processo de calandragem, é uma abordagem promissora que amplia as aplicações tecnológicas destes materiais e permite sua produção em escala industrial. Neste trabalho foram desenvolvidos compósitos de borracha nitrílica com fibras de sisal, e borracha nitrílica com carbonato de cálcio e fibras de sisal.[39]

Os compósitos foram processados em moinho de dois rolos, em condições otimizadas de processamento. Analisou-se a influência do teor de carbonato, tamanho e teor das fibras de sisal bem como do tratamento de mercerização das fibras nas propriedades dos compósitos. Os compósitos, com as fibras curtas aleatoriamente distribuídas, foram caracterizados através de ensaios mecânicos, microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise termogravimétrica (TG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC).[39]

O tratamento de mercerização promoveu a remoção de lignina e hemicelulose da superfície das fibras de sisal aumentando sua adesão à matriz de borracha. O tamanho critico de fibras, determinado para reforço nesta matriz nitrílica, foi de 6 mm, sendo que o teor crítico de fibras foi de 11 pcr para a matriz de borracha pura e de 5,5 pcr para a matriz combinada com carbonato de cálcio. Determinou-se que o teor ideal de carbonato é de 67 pcr.

As análises térmicas (TG e DSC) mostraram que os compósitos são termicamente estáveis até a temperatura em torno de 300°C. Os materiais obtidos possuem uma boa relação custo benefício tornando promissora sua utilização.[39]

3.7.3. Compósito de borracha natural proveniente da Guayule reforçado com microfibras de celulose

O Compósitos de borracha natural proveniente da Guayule (*Parthenium argentatum*) e microfibras de celulose, extraídas de fibras de algodão por hidrólise ácida, foram estudados e caracterizados por ensaio de tração e microscopia eletrônica de varredura.[40]

Os compósitos foram obtidos misturando as fibras dispersas em água com o látex nas proporções pré-estabelecidas. Os filmes foram feitos vertendo as soluções sobre superfície de vidro e deixado secar a temperatura ambiente. Após uma semana os filmes foram destacados do vidro, colocados entre folhas de PET e armazenados à temperatura ambiente para análises posteriores.[40]

Os resultados do ensaio de tração mostraram que houve um aumento de até 500% na tensão de ruptura em função do teor de microfibra na matriz, atingindo aproximadamente 2.5 MPa para o compósito com 15% de microfibra. Por outro lado, a deformação decresceu com o aumento do teor de fibras de até 50% do valor da borracha não reforçada. Através das micrografias foi possível observar a boa molhabilidade e dispersão das fibras na matriz de borracha, proporcionando uma boa transferência de tensão entre as interfaces.[40]

3.8.CALÇAMENTO DE BORRACHA A PARTIR DE PNEUS.

Nos Estados Unidos, 86% dos pneus velhos são reciclados fazendo calçadas ou asfalto. Cada quilômetro de estrada pavimentado com asfalto de borracha pode significar até 7 mil pneus a menos nos lixões.[3]

A prefeitura de Washington está instalando calçadas de borracha na cidade investiu inicialmente US$ 60 mil. A cidade das árvores, como é conhecida nos Estados Unidos, está cuidando com carinho do título, trocando o cimento pelo piso emborrachado em torno das árvores, para proteger as raízes e acabar com as calçadas quebradas.[3]

O cimento não permite que o ar e a água passem para o solo. Por isso, as raízes crescem para cima, em busca de alimento, e acabam empurrando e quebrando a calçada. Todo ano, a prefeitura tem que trocar blocos inteiros, quebrar o cimento e refazer tudo. Somente com os consertos, gasta cerca de US$ 5 milhões anualmente e ainda tem que se defender de processos na Justiça, porque as pessoas tropeçam, se machucam e exigem indenização.[3]

O calçamento de borracha permiti a passagem de ar e de água. Devido sua maleabilidade, também se adaptam à movimentação das raízes. O engenheiro da prefeitura

Wasi Khan acrescenta outra vantagem do projeto: as placas são feitas de pneus reciclados, material que ocupa os depósitos de lixo e preocupa as autoridades.

O amortecimento durante uma caminhada, significa um pneu de borracha a menos nos lixões. Mas o preço ainda é um problema, porém a vantagem virá a longo prazo. A calçada deve durar o triplo do tempo. [3]

A instalação do calçamento é super-rápido, porque elas se encaixam umas nas outras, uma vez que é composta por placas de borracha. Além do mais, é um trabalho simples, porque elas são bem mais leves do que qualquer material de concreto.[3]

O calçamento de borracha possui uma superfície antiderrapante, o que pode evitando acidentes, além de ter um acabamento uniforme e praticidade para sua manutenção, não existindo problemas em relação ao seu descarte, já que este pode ser totalmente reciclado para a confecção de novos calçamentos, caracterizando uma solução de pavimentação sustentável a longo prazo.[41]

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.MATERIAIS

Neste trabalho foi utilizado resíduo de pneu oriundo do processo de recauchutagem e recapagem, obtido durante a raspagem dos pneus e da retirada de rebarbas, passando por um triturador e posterior separação das partes metálicas por peneiras resultando em um resíduo de borracha (RP), como mostra a Figura 06 a. O material foi cedido pela empresa ServePneu localizada na cidade de Marabá-PA.

O resíduo de marmoraria (RM) utilizado no desenvolvimento deste trabalho é resultado do processo de corte de rochas ornamentais, principalmente granito e mármore da empresa Nova Marabá (Figura 06 d). A escória de alto-forno (EA) e a lama de alto-forno (LA) provenientes do processo de produção do ferro gusa foram cedidas pela empresa Sinobras S.A., ambas as empresas estão localizadas na cidade de Marabá-PA. A Figura 06 b e c mostram a lama de alto-forno e a escória de alto-forno, respectivamente. A Tabela 03 demostra a composição dos resíduos RM, EA e LA.

Figura 06 - Resíduos utilizados neste trabalho: (a) RP, (b) LA, (c) EA, (d) RM.

Fonte: Autor.

Tabela 02 - Composição química dos resíduos RM, EA e LA.

Composição	*RM%	EA%	LA%
CaO	3,0	29,3	7,0
Al_2O_3	12,8	20,3	0,4
Fe_2O_3	7,9	2,1	57,9
MgO	1,5	3,2	0,9
MnO	-	3,4	1,0
SiO_2	65,95	38,1	7,9
Na_2O	2,4	2,0	-
P_2O_5	-	0,1	0,1
K_2O	4,2	1,4	0,5
TiO_2	0,9	1,0	-
ZnO	-	-	2,1

Fonte: (*42).

4.2. METODOLOGIA

Neste trabalho foi realizado um estudo de compósitos para aplicação em calçamento com borracha a partir de pneu inservível, utilizando resíduo de marmoraria, escória e lama de alto-forno como alternativas de carga de reforço com intuito de reduzir a deformação, deixando o material mais rígido. Primeiramente, a EA foi moída em moinho de bola por meia hora devido estar na forma cristalizada (em forma de pedra bruta); seguindo foi realizado a análise granulométrica nos resíduos; depois foram retiradas amostras dos resíduos para a realização da caraterização mineralógica (difração de raios X). A Tabela 03 mostra as formulações estudadas neste trabalho, onde se tem a substituição parcial do resíduo RP pelos resíduos RM, EA e LA nas variações de 5, 10, 15 e 20%.

Tabela 03 - Formulações estudadas.

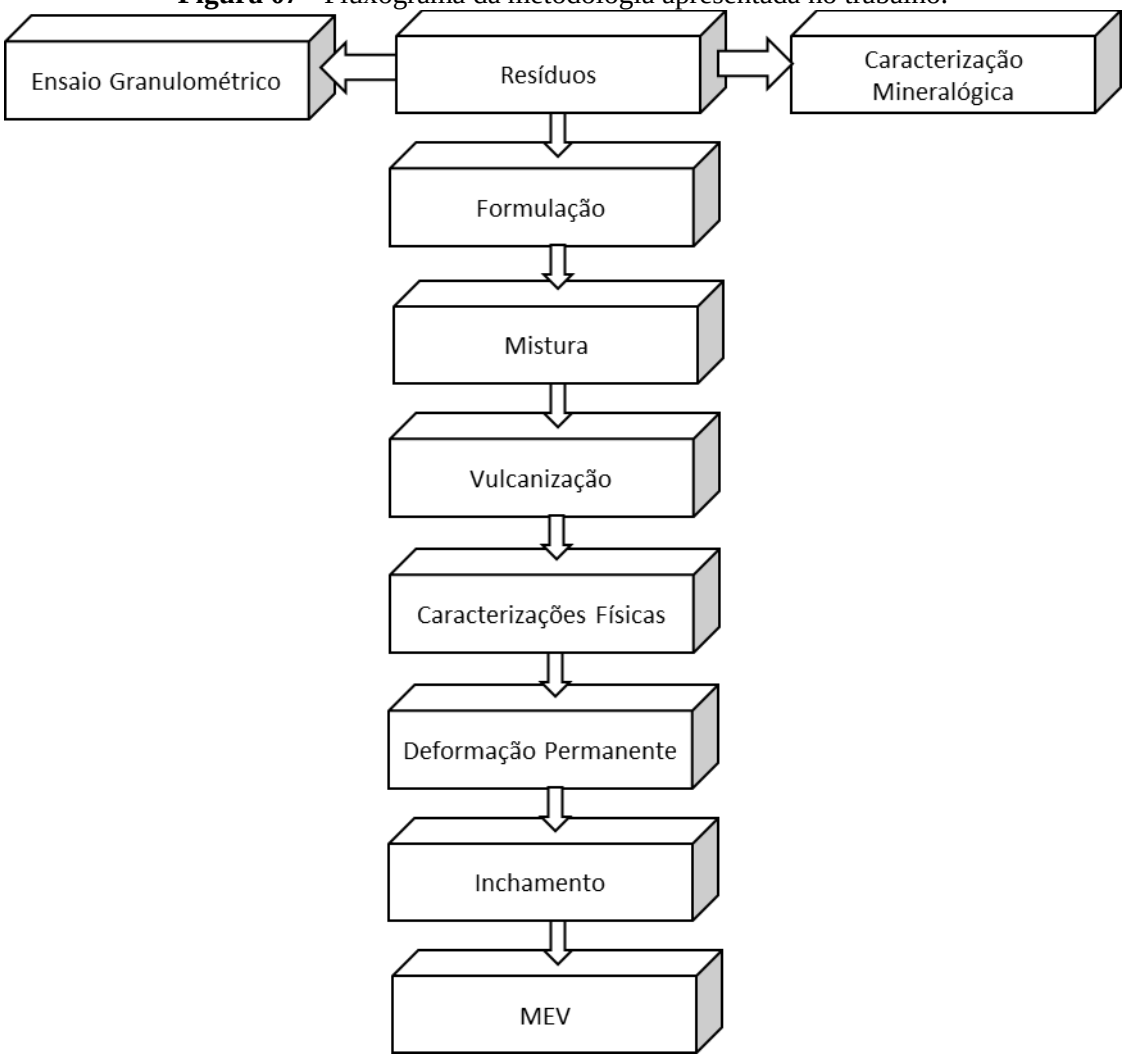
Formulações	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
RP (%)	100	95	90	85	80	95	90	85	80	95	90	85	80
RM (%)	0	5	10	15	20	0	0	0	0	0	0	0	0
EA (%)	0	0	0	0	0	5	10	15	20	0	0	0	0
LA (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	10	15	20

Fonte: Autor.

A preparação das formulações foi realizada em um moinho, via seco por um período de meia hora, para mistura e homogeneização da formulação, antes da mistura a umidade dos resíduos foi devidamente retirada em estufa. Depois da mistura, as formulações foram pré-aquecidas a 100 °C para facilitar a vulcanização e então, seguiu-se para processo de vulcanização das formulações, o qual consistiu na aplicação de calor e pressão na amostra que

está em processo, sendo este realizado em uma prensa com aquecimento (marca SOLAB modelo SL11) utilizando molde metálico,[41] variando a temperatura em 130 °C, 160 °C e 190 °C por 20 min com uma pressão de 9,5 Mpa. Após o processo de vulcanização, o material foi caracterizado fisicamente (densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água) e pelos ensaios de deformação permanente em 28 °C e 70 °C por 72 horas, ensaio de inchamento para verificação do grau de vulcanização e a análise da micrográfica em MEV. A Figura 07 mostra o fluxograma da metodologia proposta neste trabalho.

Figura 07 - Fluxograma da metodologia apresentada no trabalho.



Fonte: Autor.

4.2.1. Análises granulométricas

A distribuição de tamanho de partículas da fração fina por ensaio de peneiramento descrita pela NBR 7181, foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos da Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará.

Os resíduos foram previamente secos em estufa entre 105 °C e 110 °C por 24 h, após a secagem os resíduos foram peneirados na peneira com malha de 2 mm de abertura, e da massa passante, foram pesados 120 g em balança analítica.

Em seguida foi montado o conjunto de peneiras em ordem decrescente de malha com abertura de: 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075 mm. Os 120 g de resíduo foram colocados na primeira peneira, o jogo foi fechado e acomodado no agitador mecânico, sendo devidamente afixado.[43]

O equipamento foi ligado por 5 minutos. Ao termino desse processo, o conjunto foi desafixado do agitador, o material retido em cada peneira foi pesado para posterior cálculo de massa retida/passante e análise de tamanho de partícula.[43] A porcentagem de material que passam nas peneiras é calculada utilizando a equação 02:

$$Q_f = \left(\frac{M_h - M_i}{M_h}\right) \times 100 \qquad (02)$$

onde,

$Q_f =$ Porcentagem de material passado em cada peneira;

$M_h =$ Massa do material submetido ao peneiramento fino;

$M_i =$ Massa do material retido acumulado em cada peneira.

4.2.2. Caracterização mineralógica

As caracterizações mineralógicas qualitativas dos resíduos foram obtidas por meio de difração de raios X (DRX) em amostras na forma de pó utilizando difratômetro marca RIGAKU, modelo MINIFLEX 600, operando com radiação de Cu-Kα e 2Θ variando de 5º a 90º, com passo de 0,02/grau, velocidade de 10°/min, voltagem de aceleração de 40 KV e corrente de 15 mA.

4.2.3. Análise das características físicas

As características físicas do material analisada foram densidade aparente (Dap), porosidade aparente (PA) e a absorção de água (AA) realizadas no Laboratório de Análise Térmica da Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. A densidade foi determinada segundo a norma ASTM D 297 e as demais de acordo com o método de Arquimedes. Primeiramente as amostras com dimensões de 29 mm de diâmetro por 12 mm de espessura foram limpas e livres de irregularidades, a fim de evitar que se prendam bolhas em sua superfície durante a imersão em água destilada, liquido utilizado no

ensaio. As amostras foram imersas por 24 horas depois foram pesadas imersas em água, depois retiradas da imersão e pesadas a úmido e então foram colocadas para secar em estufa por 12 horas, seguindo foram pesadas novamente a seco.[44] E para determinação das características físicas foram utilizadas as equações 03, 04 e 05.

$$AA = \frac{Pu - Ps}{Ps} \; x \; 100 \qquad (03)$$

$$PA = \frac{Pu - Ps}{Pu - Pi} \; x \; 100 \qquad (04)$$

$$Dap = \frac{Ps}{Pu - Pi} \; x \; L \qquad (05)$$

onde:

AA = Absorção de Água;

PA = Porosidade Aparente;

Dap = Densidade Aparente;

Ps = peso do corpo de prova seco;

Pu = peso do corpo de prova úmido;

Pi = peso do corpo de prova imerso;

L = densidade do líquido usado na temperatura do ambiente.

4.2.4. Deformação permanente por compressão

Este ensaio de deformação permanente por compressão, busca avaliar a habilidade de compostos de borracha de reter propriedades elásticas após ação prolongada de tensões compressivas e é aplicado em materiais que serão submetidos a tensões estáticas. Foi utilizado o método B da norma ASTM D 395, com o corpo de prova tipo 1 (com diâmetro de 29 mm +/- 0,5 e espessura de12,5 +/- 0,5) em que este é submetido a deformação constante em ar.[45]

O ensaio foi realizado no Laboratório de Preparação de Amostras da Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. Inicialmente, mediu-se a espessura dos corpos de prova; em seguida, os mesmos foram submetidos a uma deformação constante de 25% em relação a sua altura inicial e então colocada em estufa por 72 horas. O ensaio foi realizado para duas vezes para cada formulação nas temperaturas de

30 °C e 70 °C por meio de uma estufa. A Figura 08 mostra o dispositivo em que os corpos de prova foram colocados em compressão constante.

Figura 08 - Dispositivo utilizado para o ensaio de deformação permanente.

Fonte: Autor.

Com o termino do ensaio, os mesmos foram retirados do dispositivo e após 30 minutos sua altura foi medida. A partir dos valores obtidos, calculou-se o percentual de deformação permanente através da equação 06.

$$c_B = \frac{(t_o - t_i)}{(t_o - t_n)} x\ 100 \qquad (06)$$

onde:

c_B = deformação permanente (Teste Método B) expressa como percentagem de deformação em relação a altura original do corpo de prova;

t_0 = espessura original do corpo de prova;

t_i = espessura final do corpo de prova;

t_n = abertura do dispositivo de compressão quando os corpos de prova estão sob deformação constante.

4.2.5. Ensaio de inchamento

O ensaio de inchamento foi feito a uma temperatura de 28 °C, aproximadamente. Foram selecionadas três amostras de cada formulação, com dimensões de aproximadas de 29 mm de diâmetros por 12 mm espessura. Cada amostra foi pesada e imersa em Xilol. Portanto, cada tipo de material ficou imerso por um período que variou de dez a cinquenta minutos. Sendo que a primeira amostra ficou imersa durante dez minutos, a segunda durante 30 minutos e última por 50 minutos. Após este período, cada amostra foi devidamente pesada. O grau de inchamento (S) foi calculado pela relação apresentada na equação 07.[11,46]

$$S\% = \frac{Mi - Mp}{Mp} x\ 100 \qquad (07)$$

onde:

Mp = peso da amostra antes do inchamento;

Mi = peso da amostra após o inchamento.

.

4.2.6. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

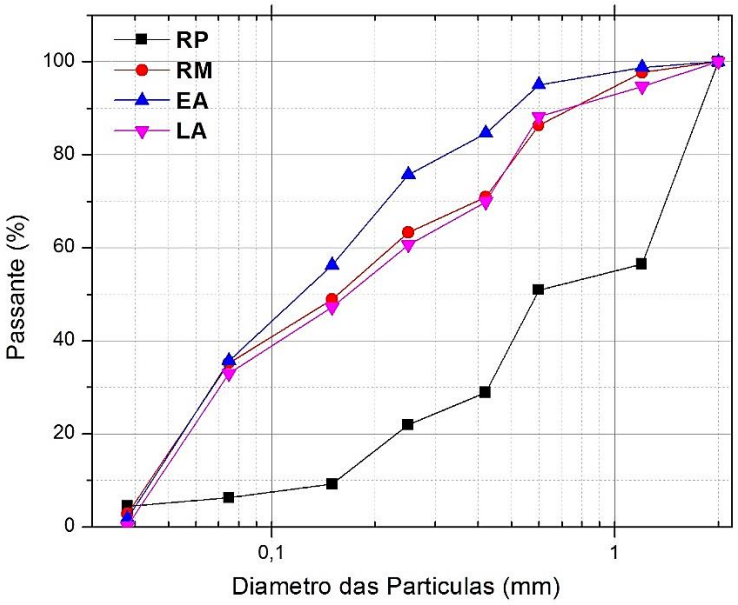
A morfologia das microestruturas foi realizada através de um Microscópio Eletrônico de Varredura de bancada da marca Hitachi, modelo TM3000 utilizando 15,0 kV, visando verificar a adesão matriz-carga, sendo realizado no Laboratório Caracterização Estrutural da Femat/Unifesspa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de vulcanização realizado a 130 °C não foi eficiente, uma vez que os corpos de provas não mantiveram sua forma ao serem retirados da matriz, e na vulcanização a 190 °C ocorreu a degradação do resíduo de borracha.

As análises granulométricas dos resíduos estão dispostas na Figura 09. Através das análises pode se observar que o RP possui 90% das partículas com diâmetro inferior a 1,77 mm, 50% das partículas inferiores a 0,60 mm e 10% inferiores 0,15 mm. Os resultados dos resíduos RM, EA e LA exibiram valores para 90% total das partículas com diâmetro menores que 0,70 mm, 0,50 mm e 0,70 mm, respectivamente, para 50% diâmetros menores que 0,15, 0,12 e 0,16 mm e 10% do total de partículas 0,05 mm para ambos os 3, mostrando que os resíduos RM, EA e LA são compostos basicamente de finos, como mostra a análise.

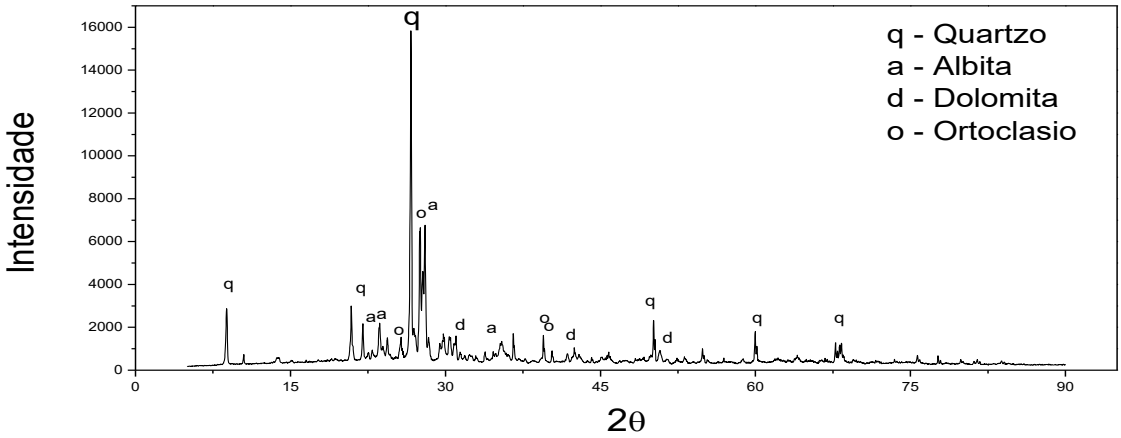
Figura 09 - Resultados das distribuições granulométrica dos resíduos.



Fonte: Autor.

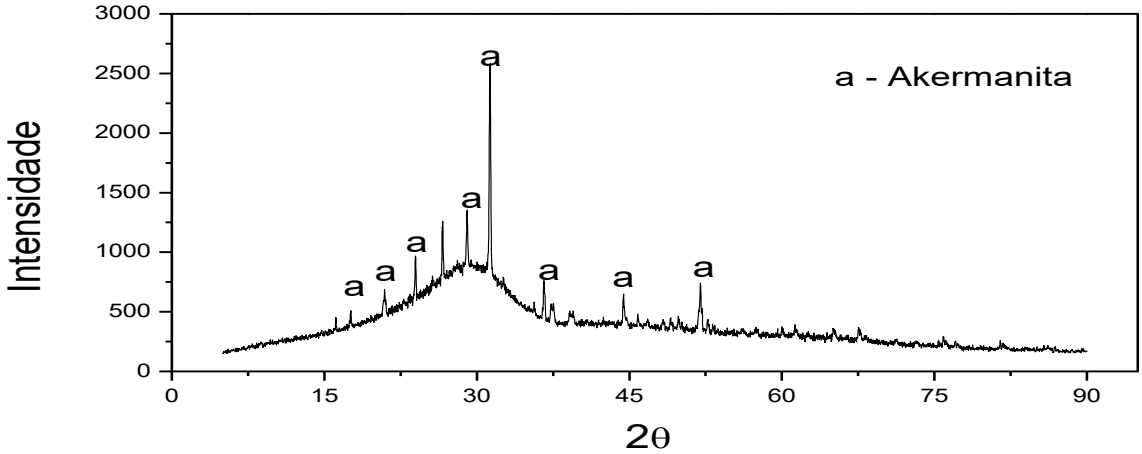
As Figuras 10, 11 e 12 apresentam a caracterização mineralógica dos resíduos RM, EA e LA. O difratograma do RM (Figura 10), mostra a presença de quartzo (SiO_2), albita ($NaAlSi_3O_8$), dolomita ($CaMg(CO_3)_2$) e ortoclásio ($KAlSi_3O_8$); percebe-se também que o difratograma está totalmente cristalina podendo haver outras fases presentes que não foram identificadas por estarem em menor quantidade. O resíduo EA apresentou apenas o mineral akermanita ($Ca_2MgSi_2O_7$), porém com a presença de fase amorfa como mostra a Figura 11. Da mesma forma o resíduo LA (Figura 12) apresentou apenas a mineral hematita (Fe_2O_3), com presença de fase amorfa.

Figura 10 - Resultado de difração de raios X do resíduo RM.



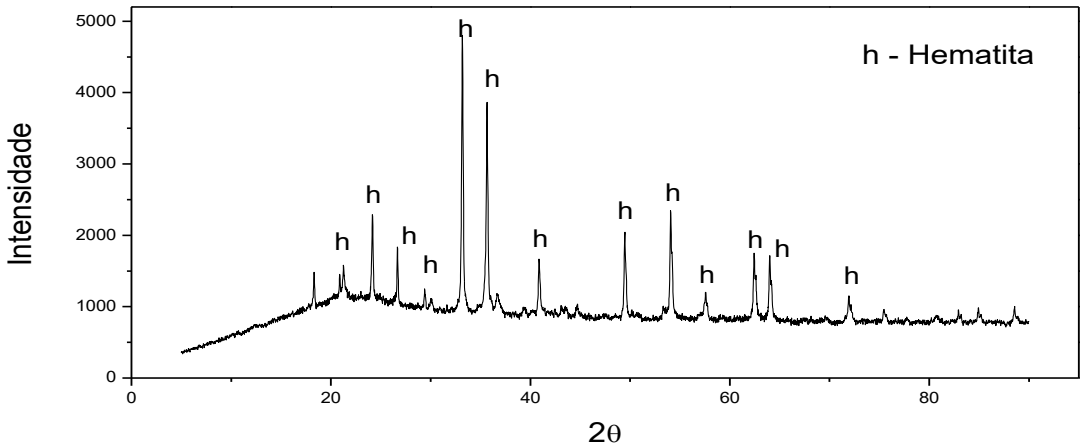
Fonte: Autor.

Figura 11 - Resultado de difração de raios X do resíduo EA.



Fonte: Autor.

Figura 12 - Resultado de difração de raios X do resíduo LA.



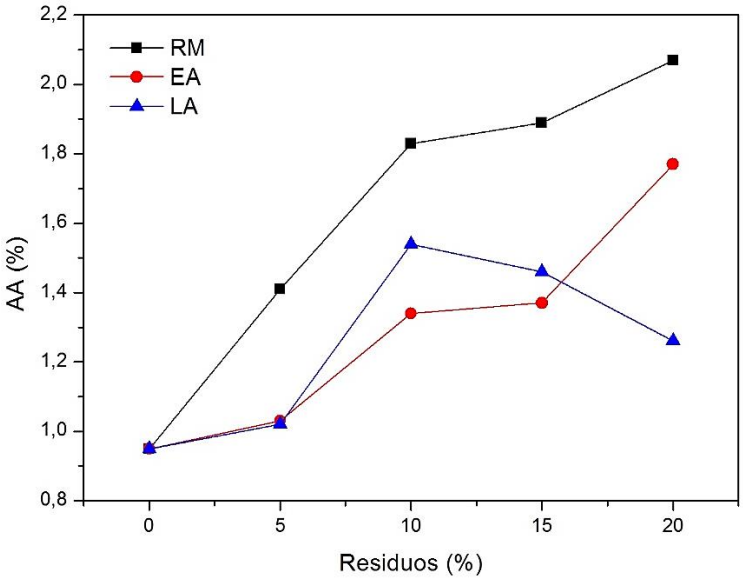
Fonte: Autor.

Os resultados das caracterizações físicas estão dispostos nas Figuras 13, 14 e 15. A Figura 13 apresenta o resultado da absorção de água em função da quantidade de resíduo

empregado. Nota-se que, com o aumento do teor de resíduo ocorreu o aumento da absorção de água, exceto para o resíduo LA que tem uma diminuição na absorção acima de 10% de LA. A porosidade aparente teve um comportamento semelhante ao da AA, uma vez que a absorção depende da porosidade. Como se observa nos resultados da PA (Figura 14), onde tem-se a porosidade em relação a variação da quantidade de resíduos. Com o aumento de RM e EA ocorreu a aumento da porosidade e para o LA a partir de 10% tem-se uma queda na porosidade. Verificou-se que, de modo geral, tanto a AA como a PA demostraram um aumento com o incremento de resíduos, este fato aconteceu possivelmente devido à falta de coesão entre partícula–partícula dos elementos de carga, fazendo com que ocorresse a formação de porosidade.

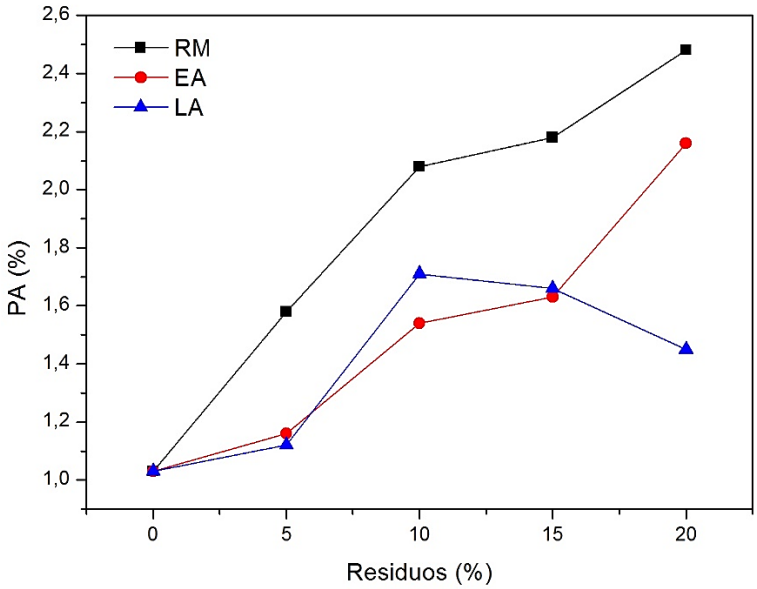
Ambos os resultados obtidos nas caracterizações AA e PA são valores relativamente baixos, compreendidos entre 0,9 - 2,1 e 1,0 – 2,5, respectivamente. Quando se compara os resultados de AA obtidos com a NBR 9781 de piso de concreto, verifica-se que a absorção de água de concreto para calçamento deve ser inferior a 6%,[47] logo todas a formulações atingiram esse parâmetro.

Figura 13 - Resultados da absorção de água.



Fonte: Autor.

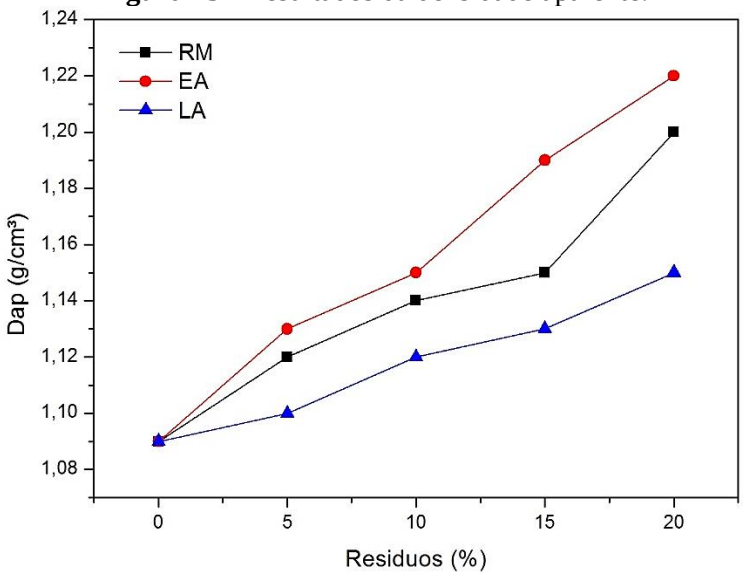
Figura 14 - Resultados da porosidade aparente.



Fonte: Autor.

A Figura 15 mostra o resultado da densidade aparente (Dap). A Dap das formulações aumentou gradualmente com a inclusão dos resíduos, mas essa variação não foi expressiva, sendo entre 1,1 a 1,2%. Obtendo maiores valores de densidade para o resíduo EA. O aumento da densidade pode ser justificado devido ao implemento dos resíduos como elemento de carga, sendo que estes possuem densidades maiores que o resíduo de borracha, e consequentemente com o aumento do teor de resíduo a densidade aumentará.

Figura 15 - Resultados da densidade aparente.

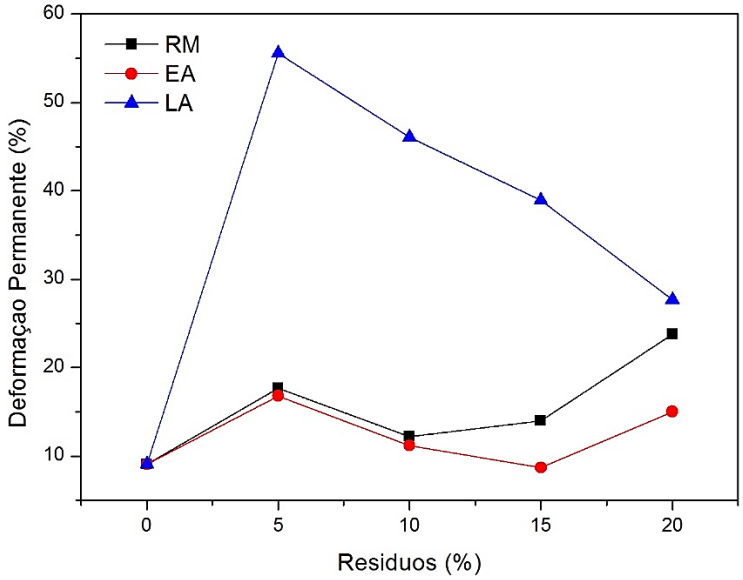


Fonte: Autor.

As Figura 16 e 17 apresentam os resultados da deformação permanente realizada a 28 °C e 70 °C, respectivamente. No ensaio a 28 °C, a amostra contendo apenas resíduo de

borracha, a F0, apresentou uma deformação permanente de aproximadamente 10%. Com o incremento do resíduo LA no teor de 5% a deformação aumentou consideravelmente em torno de 55%, e com o contínuo aumento em seu teor esse valor tendeu a diminuir, atingindo uma deformação de 27%. Para os resíduos RM e EA o comportamento é semelhante, com 5% dos resíduos ocorre um aumento da deformação em torno de 17% para ambos, a deformação tende a diminuir para próximo de 12% com o teor de 10% destes resíduos. Com o aumento do teor de resíduo EA para 15%, a deformação diminui para 8,5%; e com o teor de 20% de EA a deformação aumentou para 15%. O resíduo RM apresentou um aumento para 14%, com o teor de 15% de RM; e a deformação aumentou para 23%, para o teor de 20% de RM.

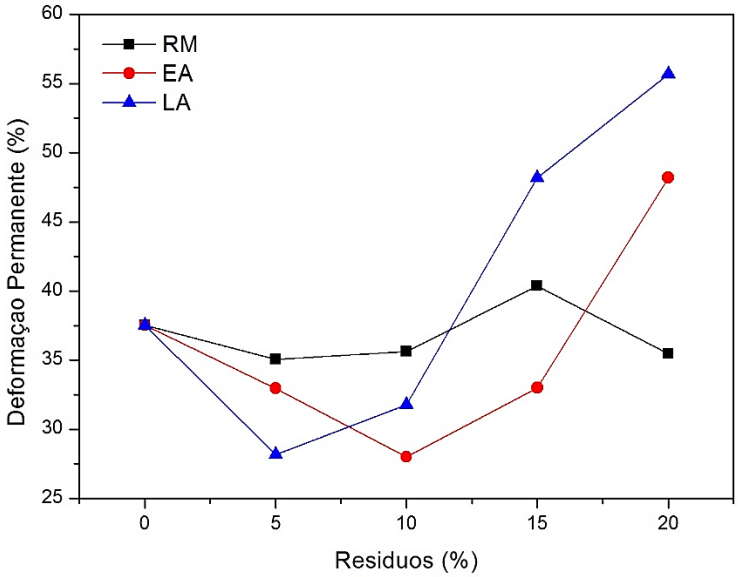
Figura 16 - Resultados do ensaio de Deformação permanente a 28 °C.



Fonte: Autor.

O ensaio de deformação permanente realizado a 70 °C teve um comportamento diferente em relação ao de 28°C. a formulação padrão a F0, teve uma deformação de 37,5%. Com a adição do RM em 5%, a deformação passou para 35%, com 10% manteve-se próximo dos 35%; em 15% de RM passou 40% e com 20% de RM diminuiu para em torno de 35% novamente. Já com a adição do resíduo EA a deformação diminuiu para 32%; com 5% de EA, reduziu para 28% com 10%, com 15% de EA aumentou para 32% e para 48% no teor de 20% de EA. Com o resíduo LA com o teor de 5% a deformação diminuiu para 28% em relação a F0. Com o aumento do teor de LA a deformação aumentou para 31%**,** 48% e 55%, para os teores de 10%, 15% e 20% de LA respectivamente.

Figura 17 - Resultados do ensaio de Deformação permanente a 70°C.



Fonte: Autor.

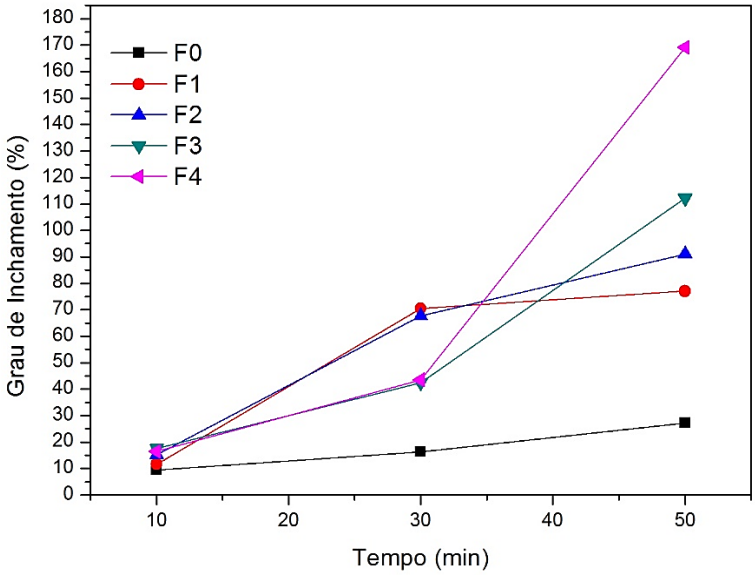
Com base no ensaio de *deformação permanente* realizado a 28 °C, observa-se que as formulações F0, F2, F3, F6 e F7 obtiveram os menores valores de deformação, indicando terem as melhores estabilidades dimensional. Uma vez que a deformação permanente é inversamente proporcional a estabilidade dimensional. Porém com o ensaio realizado a 70 °C, apresentou-se resultados diferentes, tendo as formulações F6 e F9 apresentando os menores valores de deformação. Observou-se que a maioria das formulações tiveram valores abaixo da formulação padrão, mostrando que o implemento de resíduos diminuiu a deformação permanente; exceto para as formulações F3, F8, F11 e F12. Percebeu-se também que o aumento da temperatura no ensaio faz com que a deformação aumente, isso é devido ao efeito de relaxamento das formulações, resultante dos movimentos moleculares a longas distâncias, que envolvem os segmentos da cadeia polimérica principal.[48]

O resultado do ensaio de inchamento, Figuras 18, 19 e 20, revelaram a eficiência da vulcanização na geração de ligações cruzadas e também o nível de interação entre as partículas de carga (resíduos RM, EA e LA) e a matriz elastomérica (resíduo RP). Em geral, menores valores de inchamento são devido a maiores níveis de vulcanização obtidos e maiores interações. A presença da carga pode ampliar ou reduzir o efeito da vulcanização devido a fenômenos como adsorção de componentes.[11]

A Figura 18 apresenta os resultados do ensaio de inchamento realizado com o resíduo RM representado pelas formulações: F1, F2, F3 e F4. Quando se compara os resultados dessas formulações com a formulação F0 (sem de elemento de carga), observa-se que ocorreu um aumento significativo no grau de inchamento. Indicando que houve um baixo nível de

ligações cruzadas, havendo também pouca interação entre o resíduo de borracha e o RM, ocasionando uma lixiviação do RM.

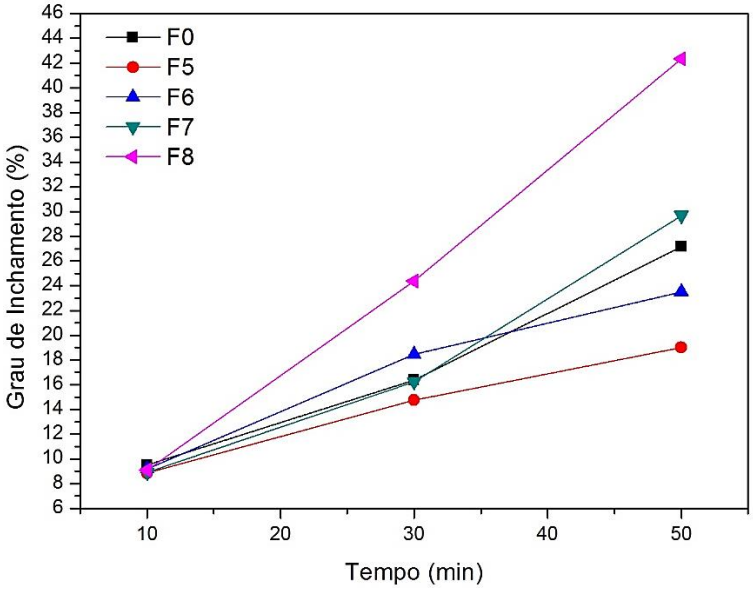
Figura 18 - Resultados do ensaio de inchamento utilizando o resíduo RM.



Fonte: Autor.

O resultado do ensaio de inchamento das formulações F5, F6, F7 e F8 (Figura 19), no qual se teve o incremento do resíduo EA, mostra que as formulações tiveram bons resultados na formação de ligações cruzadas, principalmente para os teores de 5% e 10% que alcançaram grau de inchamento inferior da formulação padrão, mostrando uma eficiência do processo de vulcanização.

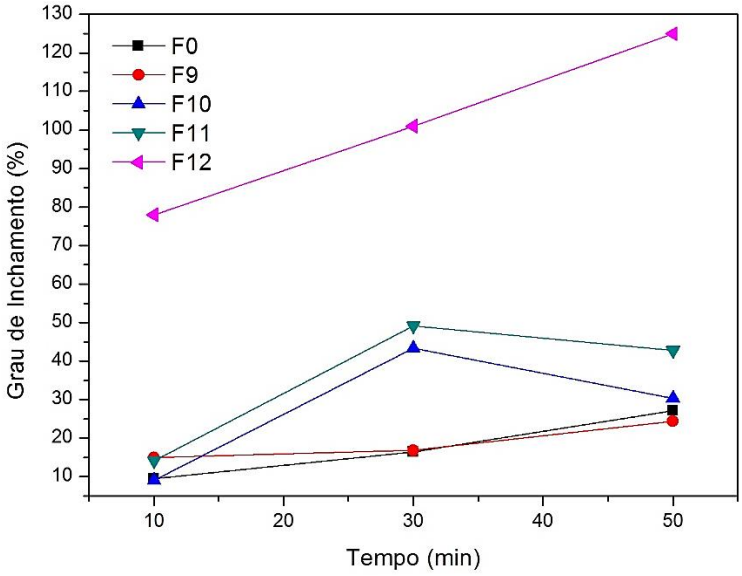
Figura 19 - Resultados do ensaio de inchamento utilizando o resíduo EA.



Fonte: Autor.

Conforme a Figura 20, os resultados do ensaio de inchamento para as formulações com o resíduo LA (F9, F10, F11 e F12), apresentaram valores baixos para o grau de inchamento, exceto para amostra com 20% de LA. As formulações F9 e F10 apresentaram os melhores resultados para o resíduo LA, tendo valores próximo a da F0, obtendo bons níveis de ligações cruzadas.

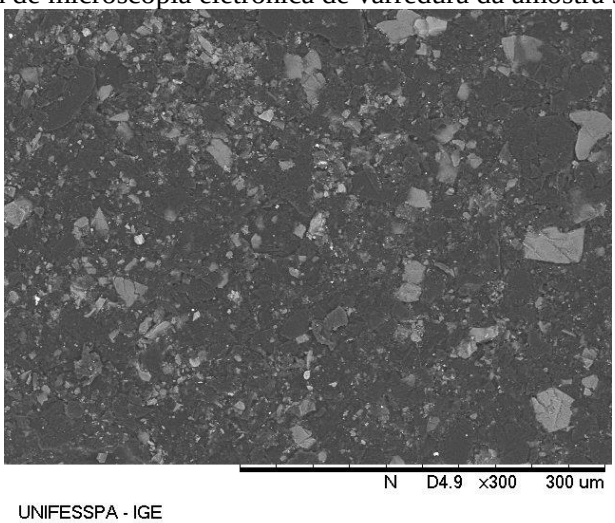
Figura 20 - Resultados do ensaio de inchamento utilizando o resíduo LA.



Fonte: Autor.

As micrografias da superfície das formulações obtidas através do MEV com um aumento de 300x, demostram a interação do elemento de carga com a matriz, assim como sua homogeneização. Na Figura 21 referente a F0, contendo apenas RP apresenta uma boa interação entre suas partículas; percebe-se também a presença de uma fase clara referente aos elementos que fazem parte da composição química do pneu conforme a Tabela 1.

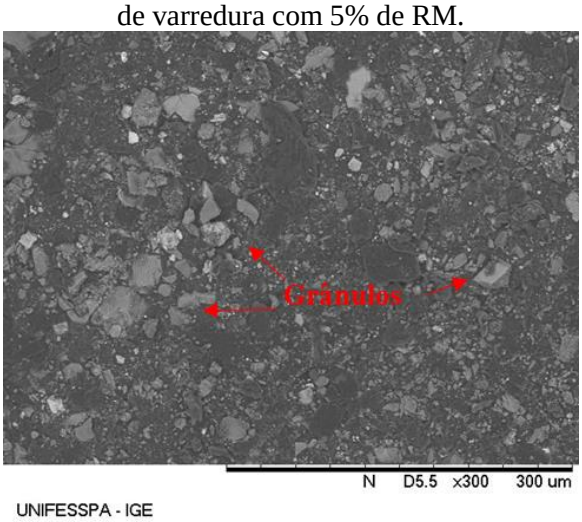
Figura 21 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura da amostra sem reforço.



Fonte: Autor.

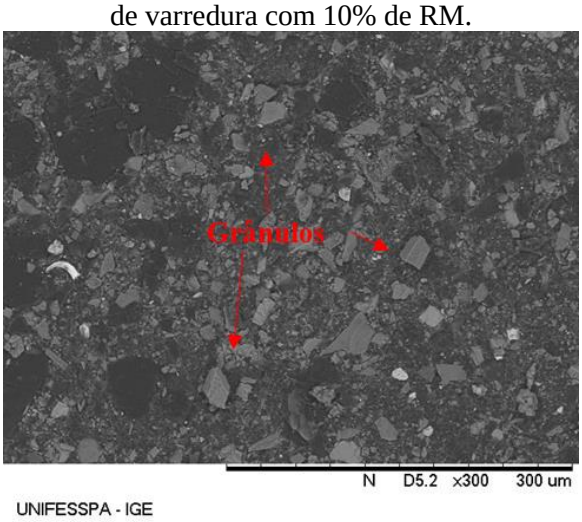
As Figuras 22, 23, 24 e 25 apresentam as micrografias eletrônica de varredura com a utilização de RM como elemento de carga. A Figura 19 com a utilização 5% de RM, apresenta baixa interação da carga (RM) como a matriz (RP), uma vez que se observa grânulos na superfície. Com o aumento no teor de RM para 10%, 15% e 20%, percebe-se o aumento na quantidade dos grânulos na superfície e ocorre a formação de fissuras, mostrando que o aumento do RM diminui a interação, justificando os resultados obtidos no ensaio de inchamento, como mostra as Figuras 23, 24 e 25, respectivamente.

Figura 22 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 5% de RM.



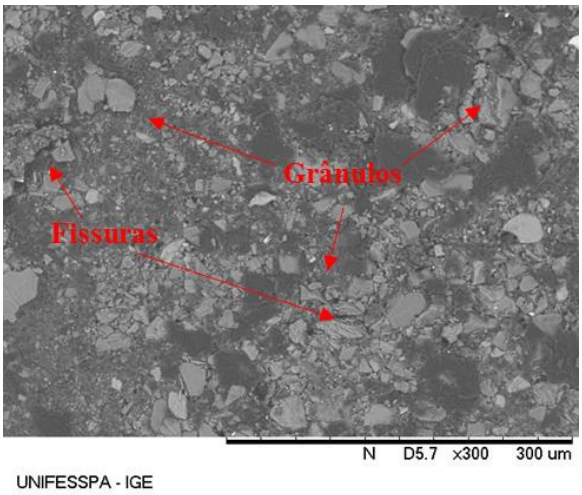
Fonte: Autor.

Figura 23 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 10% de RM.



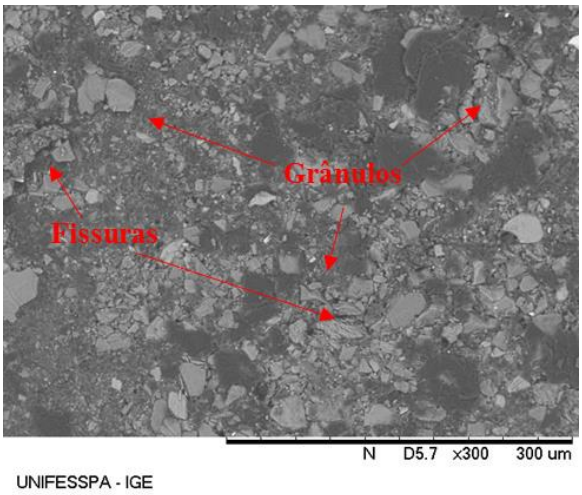
Fonte: Autor.

Figura 24 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 15% de RM.



Fonte: Autor.

Figura 25 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 20% de RM.

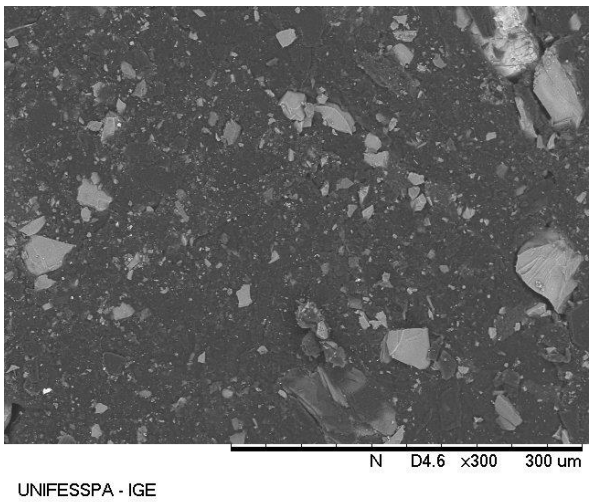


Fonte: Autor.

A Figura 26 mostra a microscopia eletrônica de varredura para formulação F5 contendo 5% de EA, a qual se observa uma boa interação entre a carga e a matriz; Com 10%

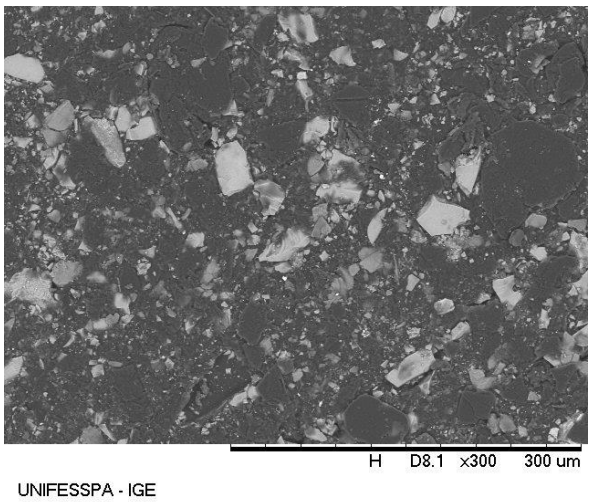
de EA (Figura 27) também se observa uma boa interação da carga com a matriz, pois não houve a presença de grânulos; com 15% de EA a interação teve uma diminuição como mostra a Figura 28, perceptível pelo início da formação dos grânulos. Para o teor de 20% de EA (Figura 29) percebe-se que ocorreu a diminuição da interação entre a carga e a matriz, perceptíveis pela presença de grânulos na micrografia.

Figura 26 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 5% de EA.



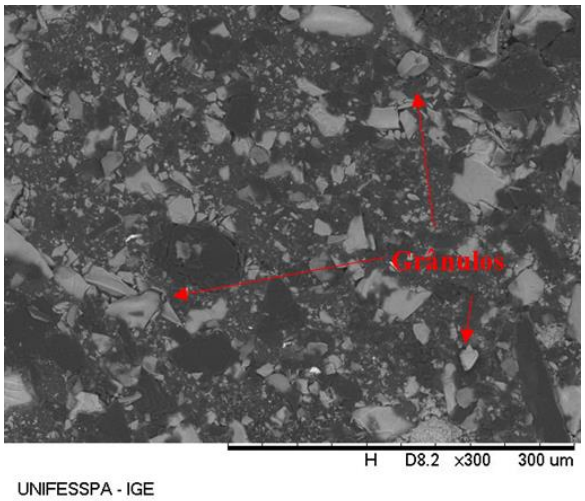
Fonte: Autor.

Figura 27 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 10% de EA.



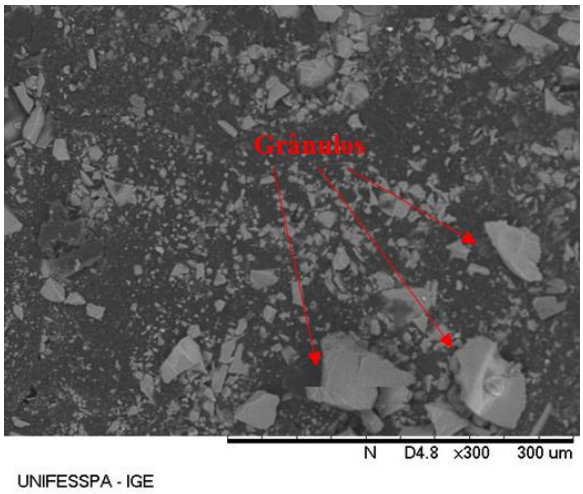
Fonte: Autor.

Figura 28 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 15% de EA.



Fonte: Autor.

Figura 29 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 20% de EA.



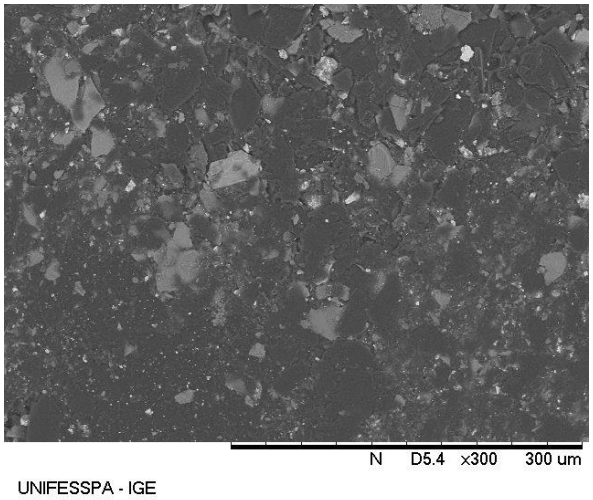
Fonte: Autor.

As micrografias contendo LA como elemento de carga estão dispostos nas Figuras 30, 31, 32 e 33, na qual os teores de 5% (Figura 30) e 10% (Figura 31) observa-se uma boa interação do elemento de carga como a matriz; com os teores de 15% (Figura 32) e 20%

(Figura 33) também apresenta uma boa adesão entre a carga e a matriz, porém observa-se a presença de fissuras.

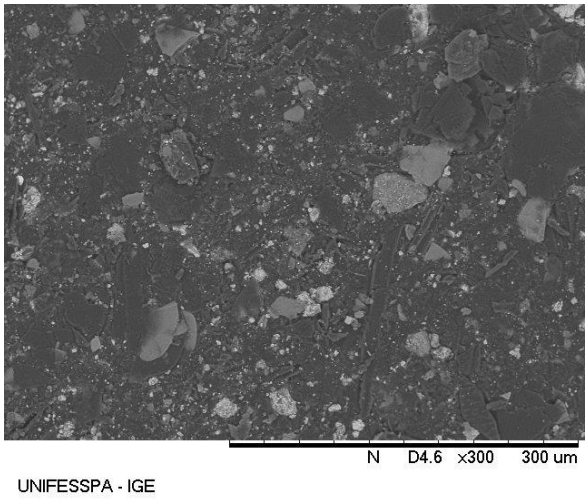
Comparando as micrografias com os difratogramas dos resíduos e resultados do ensaio de inchamento, pressupõe-se que a presença de fase amorfa favorece a interação da carga com a matriz, uma vez que as formulações com resíduos RM e LA que possuem fase amorfa obtiveram resultado de interação e níveis de ligações cruzadas melhores, porém necessita-se utilização de técnicas mais elaboradas que poderão comprovar essa hipótese.

Figura 30 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 5% de LA.



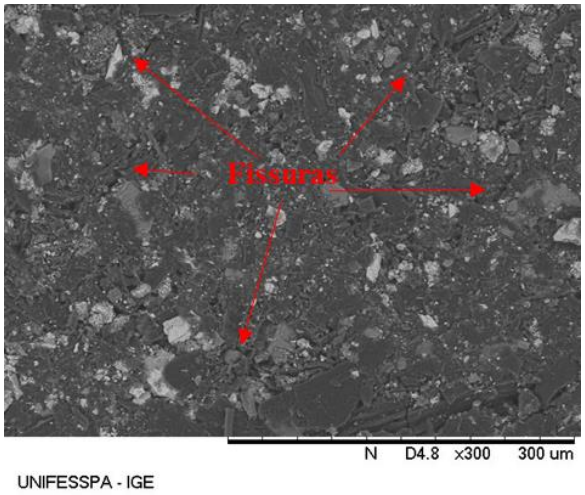
Fonte: Autor.

Figura 31 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 10% de LA.



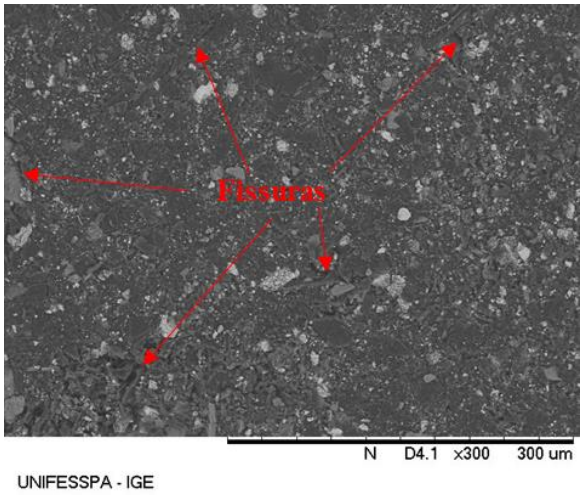
Fonte: Autor.

Figura 32 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 15% de LA.



Fonte: Autor.

Figura 33 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura com 20% de LA.



Fonte: Autor.

6. CONCLUSÕES

Através deste estudo possibilitou-se uma nova alternativa para destinação adequada para os pneus inservíveis, uma vez que estes em sua maioria estão abandonados em lixões. A metodologia utilizada possibilitou a síntese dos compósitos.

O emprego dos resíduos EA e LA utilizados como reforços de carga se mostrou viável, pois os mesmos apresentaram os melhores resultados neste trabalho, quando empregados em até 10% em peso nos compósitos, uma vez que seu aumento influencia na interação da matriz, modificando as propriedades do compósito. Além disso, o uso destes resíduos é vantajoso, pois minimiza possíveis problemas ambientais.

Os compósitos F5, F6, F9 e F10 se mostraram excelentes candidatos para aplicação em calcamento diante das técnicas utilizadas neste estudo, apresentando baixa densidade e porosidade conferindo ao material trabalhabilidade, boa interação carga-matriz e bons níveis de formação de ligações. Porém, é necessária a realização de ensaio mecânico para avaliar sua resistência à tração e análise do desgaste abrasivo e corrosivo para destes compósitos.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para aprimorar este trabalho, sugere-se a realização dos seguintes estudos:

- Avaliar a influência da granulometria das partículas de resíduos, nas propriedades;
- Realizar ensaio de dureza Shore A, ensaio de tração, ensaio de desgaste nos compósitos;
- Avaliar a toxidade dos compósitos;
- Avaliar a propriedades em função das variáveis do processo utilizado: temperatura, tempo e pressão.

REFERÊNCIAS

1 ANDRADE, H. S. **Pneus inservíveis: alternativas possíveis de reutilização.** 2007. 101 f. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

2 GALLE, A. H. et al**.** A influência do pneu no meio ambiente. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CIÊNCIAS INTEGRADAS, 7., 2010, Guarujá. **Anais eletrônicos**... Guarujá: UNAERP, 2010. Disponível em: <http://www.unaerp.br/sici-unaerp/edicoes-anteriores/2010/secao-1-6/1196-a-influencia-do-pneu-no-meio-ambiente/file>. Acesso em: 23 jan. 2016.

3 BAZANTE, G. Piso Reciclável. **Canteiro de Obras,** 16 ago. 2010. Disponível em: <http://canteirodiobras.blogspot.com.br/2010/08/piso-reciclavel.html>. Acesso em: 23 jan. 2016.

4 MANO, E. B.; MENDES, Luís C.; **Introdução a polímeros**. 2ª Ed. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 1999.

5 RODRIGUES, E. B. **Estudo da estabilidade das propriedades mecânicas e químicas de compostos de borracha vulcanizados com enxofre após envelhecimento térmico e oxidativo.** 2010. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

6 GOMES, D. M.; ROBERT, R.; KOWALSKI, E. L. Corrente de absorção e reabsorção em dielétricos. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 3307-3307, set. 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172008000300007&lng=es&nrm=iso>. Acesso em: 20 dez. 2015.

7 Tanaka, Y. *Structural characterization of natural polyisoprenes: Solve the mistery of natural rubber based on structural study*. **Rubber Chemistry and Technology**. v.74 n. 3; p. 335-375; jul, 2001. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.5254/1.3547643>. Acesso em: 20 dez. 2015.

8 ROCHA, T. C. J.; SOARES, B. G.; COUTINHO, F. M. B. Principais copolímeros elastoméricos à base de butadieno utilizados na indústria automobilística. **Polímeros**. 2007, v.17 n. 4, p. 299-307. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282007000400009>. Acesso em: 20 dez. 2015.

9 SOUZA, C. M**. Utilização da radiação ionizante na reciclagem de pneus inservíveis de automóvel e sua destinação ambiental adequada -** Dissertação de Mestrado. IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES.

10 MICHAELI, W. et al. **Tecnologia dos plásticos**. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1995.

11 Almeida Júnior, E. **Utilização de PET pós consumo como carga para borracha natural.** 2012. 47 f**.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

12 CLAVELARIO, R. F. **Processamento de elastômeros na fabricação de pneumáticos.** 2012. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em produção de Polímeros) - Centro Universitário Estadual Da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2012.

13 BRITO, K. J. S. **Nanocompósitos de borracha SBR com nanoargila organicamente modificada.** 2009. 86 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

14 OLIVEIRA, V. **Tecnologia dos compostos elastoméricos carregados com sílica.** 2012 20 f. DOSSIÊ TÉCNICO. - Centro Tecnológico de Polímero SENAI. Rio grande do sul, 2012.

15 GARBIM, V. J. **Borrachas: Tecnologia, características, compostos e aplicações**.1ªED. EDITORA PUBLIT. RIO DE JANEIRO, 2012.

16 RODGERS, B. **Rubber Compounding: Chemestry and Apllications**. 1a ed – Marcel Dekker, Inc. New York, 2004.

17 WALLAUER, F. A. et al. Estudo e avaliação da adição de cinza de casca de arroz à borracha EPDM. In: 11 Congresso Brasileiro de Polímeros - CBPol, 2011, Campos do Jordão - SP. **Anais:** 11 Congresso Basileiro de Polímeros, 2011. p. 4702-4707. 1 CD-ROM.

18 OLIVEIRA, O. J.; CASTRO, R. Estudo da destinação e da reciclagem de pneus inservíveis no Brasil. In: XXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Foz do Iguaçu, PR, 2007. **Anais**... Foz do Iguaçu: ENEGEP, 2007. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007_tr650481_0291.pdf> Acesso em: 20 abr. 2015.

19 ENCUENTRO HUMBOLDT. A participação da problemática ambiental na produção do espaço urbano das cidades gêmeas de Ponta Porã. **EListas.net**. Disponível em: <http://elistas.egrupos.net/lista/encuentrohumboldt/archivo/indice/3201/msg/3280/> Acesso em: 20 abr. 2015.

20 ANDRIETTA, A. J. **Pneus e o meio Ambiente: Um grande problema requer uma grande solução**. 2002. Disponível em: <http://www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br>. Acesso em: 15 abr. 2015.

21 ANDRADE, H. S. **Pneus inservíveis: alternativas possíveis de reutilização**. 2007, 101 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

22 KAMIMURA, E. Utilização de resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil. In: ENCONTRO TECNOLÓGICO DA ENGENHARIA CIVIL E ARQUITETURA, 5., 2005, Maringá. **Anais...** Maringá, 2005.

23 RECAUCHUTA BRASIL. **Recapadores mostram como estão remando contra a crise na feira realizada em São Paulo.** Disponível em: <http://www.cargapesada.com.br/edicoesanteriores/edicao105/recau105.htm>. Acesso em: 28 nov. 2015.

24 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004 Resíduos sólidos** – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

25 BERTOLLO, S. A. M., et al. Pavimentação asfáltica: uma alternativa para a reutilização de pneus usados. Rio de Janeiro. **Revista Limpeza Pública** nº 54, jan. 2000. Disponível em: <http://www.revistaocarreteiro.com.br/ano2000/Edicao316/reciclagem.htm >. Acesso em: 26 abr. 2015.

26 CONAMA. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução n. 416 de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências, Brasília. Disponível em: <http://www.cntdespoluir.org.br/Downloads/res41609.pdf>. Acessado em: 30 nov. 2015.

27 SOUZA R. T. **Análise da logística reversa de pneus usados e inservíveis e seus impactos ambientais quando descartados inadequadamente.** 2009. 64 f. Monografia. (Tecnólogo em Logística) - Faculdade de Tecnologia da Zona Leste. São Paulo, 2009.

28 RESENDE, E. **Canal de Distribuição Reverso na Reciclagem de Pneus: Estudo de Caso**. 2004. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro, 2004.

29 REIS, C.; FERRÃO, P. PROTAP - **Produção, utilização e opções de fim de vida para pneus.** Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2000.

30 GOLDENSTEIN, Marcelo. Panorama da indústria de pneus no Brasil: Ciclo de investimento, novos competidores e a questão do descarte de pneus inservíveis**. BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 25, p. 107-130, mar. 2007. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/conhecimento/bnset/set2504.pdf>. Acesso em: 12 maio 2015.

31 MOTTA, F. G. A cadeia de destinação dos pneus inservíveis: o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. **Ambient. soc.**, Campinas , v. 11,n. 1, p. 167-184,jun. 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2008000100012&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 08 fev. 2016.

32 FARIA, J. S.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Incorporação de resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em Cerâmica Vermelha. 2014. In: 21 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECiMat, 2014, Cuiabá - MT. **Anais:** 21 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECiMat, 2014. p. 1678-1682. 1 CD-ROM.

33 RIBEIRO, V.A.S. et al. Reciclagem de escória cristalizada para a produção de argamassa. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 339-345, 2007 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762007000200012&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 09 Fev. 2016.

34 VIEIRA, C. M. F. et al. Incorporação de lama de alto forno em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 53, n. 328, p. 381-387, Dez. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132007000400008&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 09 Fev. 2016.

35 CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e engenharia dos materiais: Uma Introdução**. LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A. Rio de Janeiro, 2002.

36 MICHEL, J.-M., *Contribuition a l'histoire industrielle des polymers em France*. ***Rev de Societé Chimique de France,*** Societé Chimique de France: Paris, 2000.

37 Landel, R.F. and L.E. Nielsen, ***Mechanical properties of polymers and composites*****. 2nd ed. Mechanical engineering**, ed. M. Dekker1994, New York: Marcel Dekker Inc.

38 MASSAROTTO, M. et als. Obtenção e caracterização de compósitos elastoméricos com resíduos de SBR da indústria calçadista. **Rev. Iberoamericana de Polímeros**, V. 11 n. 2, p. 110-117. Mar 2010. Disponível em: <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/MAR10/massarotto.pdf>. Acessado em 12 abr. 2016.

39 IOZZI, Marco A.; MARTINS, Maria A.; MATTOSO, Luiz H. C.. Propriedades de compósitos híbridos de borracha nitrílica, fibras de sisal e carbonato de cálcio. Polímeros, São Carlos, v. 14, n. 2, p. 93-98, Jun. 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282004000200012&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 12 abr. 2016.

40 MALMONGE, J. A. et al. Compósito de borracha natural proveniente da Guayule reforçado com Microfibras De Celulose. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 10., 2009, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Carlos: Associação Brasileira de Polímeros, 2009. 1 CD-ROM.

41 FREITAS, A. M. **A produção de pisos de borracha e sua utilização em cruzamentos rodoferroviários.** 2010. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2010.

42 MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. **Cerâmica**. São Paulo, v. 49, n. 312, p. 262-267, Dez. 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132003000400012&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 19 Abr. 2016.

43 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 7181 -** Solo - Análise Granulométrica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

44 *American Society for Testing and Materials,* ***ASTM D29781*** *- "Stand Test Methods for Rubber Property - Density - Hydrostatic Method - Physical Analysis* ". 1995. *Annual Book of ASTM Standards, Section 16, West Conshohocken*, PA, 2006.

45 *American Society for Testing and Materials,* ***ASTM D39597*** *- "Stand Test Methods for Rubber Property - Deformação permanente". 1995. Annual Book of ASTM Standards*, v. 09.01, Philadelphia, 1995.

46 CANEVAROLO Jr., S. V. **Ciência dos polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. Artliber Editora. São Paulo, 2002.

47 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 9781- Peças de concreto para pavimentação**. Rio de Janeiro, 2013.

48 CASSU, S. N.; FELISBERTI, M. I. Comportamento dinâmico-mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas. **Quím. Nova**. São Paulo, v. 28, n. 2 p. 255-263, Mar. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422005000200017&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 01 Mar. 2016.