FUNDAÇÃO PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS – FUPAC
FACULDADE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS DE UBÁ
ENGENHARIA CIVIL

GIOWANA MARIA RIBEIRO BORGES

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ASFALTO BORRACHA E ASFALTO CONVENCIONAL

UBÁ – MG

2018

GIOWANA MARIA RIBEIRO BORGES

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ASFALTO BORRACHA E ASFALTO CONVENCIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Fundação Presidente Antônio Carlos de Ubá, como requisito parcial para obtenção do titulo de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Dr.ª Suymara Toledo Miranda.

UBÁ – MG

2018

Dedico este trabalho aos meus pais, que durante todos esses anos nunca mediram esforços para realizar os meus sonhos. Obrigada por sempre me mostrarem o melhor caminho a se seguir. Deixo em destaque minha mãe, que em um período conturbado não mediu esforços para me ajudar.

A minha irmã, por sempre estar ao meu lado, me apoiando e incentivando.

Ao meu namorado, Marcos, que ajudou muito durante todo esse período, pelo companheirismo, dedicação, compreensão e também pela paciência.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, por me guardar e guiar durante todos esses anos, me dando força e perseverança para vencer todos os obstáculos enfrentados.

A minha orientadora Drª Suymara Toledo Miranda, pela paciência, atenção, disponibilidade e pelas suas sugestões que foram preciosas para a concretização deste projeto.

A minha amiga Sayonara agradeço a colaboração e ajuda. Você foi/é essencial.

Aos meus amigos da faculdade que muito me ajudaram na construção deste trabalho e em toda a trajetória nesses anos. Obrigada por todas as dicas e sugestões.

E a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a elaboração deste trabalho.

O sucesso não consiste em não errar,
mas em não cometer os mesmos
equívocos mais de uma vez.
George Bernard Shaw

Resumo

O modal rodoviário é o maior meio de deslocação de pessoas e mercadorias utilizados nacionalmente. Em um país onde esse modal é destaque, a sua pavimentação deve ser levada em caráter de prioridade. Dessa forma, foi estudada uma alternativa que melhorasse o ligante asfáltico aumentando a sua vida útil e que trouxesse benefícios ambientais. O presente trabalho tem como objetivo mostrar o desempenho do asfalto modificado com borracha moída de pneu e compará-lo com o asfalto convencional. Para tal, buscou-se um referencial teórico, por meio de uma pesquisa bibliográfica em publicações de autores da área. Em comparativo com o asfalto convencional, o asfalto borracha se mostra mais viável a longo prazo no sentido financeiro, além da melhoria imediata nas propriedades mecânicas do ligante asfáltico.

Palavras chave: Asfalto borracha. Asfalto convencional. Pneus inservíveis. Pavimento. Rodovia.

Abstract

Road transport is the largest means of transporting people and goods used domestically. In a country where this modal is highlighted, its paving must be taken as a priority. In this way, an alternative was studied that improved the asphalt binder increasing its useful life and that it brings environmental benefits. The present work aims to show the performance of modified asphalt with ground tire rubber and to compare it with conventional asphalt. For this, a theoretical reference was searched, through a bibliographical research in publications of authors of the area. Compared with conventional asphalt, rubber asphalt is more viable in the long term in the financial sense, besides the immediate improvement in the mechanical properties of the asphalt binder.

Keywords: asphalt rubber, conventional asphalt, unserviceable tires, pavement, highway

1 INTRODUÇÃO

Como um sistema de pavimentação essencial, o asfalto já é utilizado há muitos anos em vários países no mundo. Em território nacional, sua expansão se deu na década de 1950, no governo de Juscelino Kubitschek, que havia adotado o lema “50 anos em 5”, abrangendo nesse desenvolvimento, principalmente, a área de transportes. De acordo com o plano de metas de Kubitschek - publicado em 1958 - seriam realizados aumentos de 17 mil quilômetros de rodovias, sendo essas alcançadas no ano de1960.

Segundo o levantamento do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) em 2017, no Brasil, 70% das vias pavimentadas com o asfalto convencional estão em boas condições. Ele é usado, em sua maioria, por seus componentes terem alto teor de ligação, e, em sua mistura, resultar em um ligante impermeabilizante, durável e resistente (BERNUCCI et al., 2008).

Nos últimos anos o mercado de veículos esteve em alta devido às facilidades de compra oferecida aos cidadãos, como: financiamentos e as baixas de juros. Esse aumento na frota veicular traz preocupações entre elas como, por exemplo, fazer o descarte de pneus inservíveis.

O reaproveitamento de pneus foi bem aceito, principalmente no ramo da engenharia de pavimentações. Foram desenvolvidas pesquisas utilizando borracha moída proveniente de pneus juntamente com aditivos asfálticos, com intuito de criar um material para ajudar na manutenção dos asfaltos.

Atualmente os custos investidos em pavimentações são elevados, e os impactos gerados ao meio ambiente são ainda maiores. Um pneu demora mais de 400 anos para começar a se decompor, e sua incineração é prejudicial ao meio ambiente, devido à liberação de gases, dentre eles, o monóxido de carbono (CO). Ressaltando assim, uma alternativa tanto para o descarte de pneus sem finalidade quanto para outras formas de pavimentações ecológicas.

Dessa forma, será realizada uma revisão bibliográfica comparativa entre asfalto convencional e asfalto borracha, levantando os pontos mais importantes como o custo-benefício, o impacto ambiental gerado e as vantagens de suas utilizações. O estudo visa evidenciar os benefícios do asfalto borracha como

alternativa de pavimentação, bem como solução para redução dos problemas ambientais gerados com o descarte inadequado de pneus inservíveis.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Transportes

O Sistema de Transportes é responsável pela logística do país, e está diretamente ligado ao seu desenvolvimento. É um meio que procura o melhor custo benefício para o deslocamento de materiais e pessoas, sendo responsável por uma parcela dos custos logísticos dentro de uma empresa e, detém participação significativa no Produto Interno Bruto (PIB) nacional (CNT, 2014).

Segundo Faria e Costa (2007), transporte está entre os principais componentes logísticos em uma empresa, ligado a três fatores cruciais: custo, faturamento, e lucro. No mais, o transporte traz consigo a qualidade do serviço logístico, já que é primordial no tempo de entrega, confiabilidade e segurança dos produtos. O Transporte atualmente se divide em diversos modais, sendo eles: rodoviário, ferroviário, hidroviário, dutoviário e aeroviário.

2.1.2 Transporte Rodoviário

O transporte rodoviário brasileiro começou a se desenvolver de forma notória a partir da década de 1950 no governo de Juscelino Kubitscheck, devido às facilidades que o transporte marítimo e o ferroviário não ofereciam, como a rapidez de transporte e de mercadorias, o modal rodoviário ganhou ainda mais espaço no mercado (PRESTEX, 2018).

Uma pesquisa da Confederação Nacional dos Transportes (2017) aponta que o estado das rodovias federais em bom estado aumentou de 18,7% para 42,7%. Em contrapartida as rodovias em condição inadequada atingem a marca de 57,3% (CNT, 2017).

Ainda dentro da pesquisa, a região sudeste possui a melhor pavimentação dentre as regiões, atingindo 55,4% de malha rodoviária em ótimo estado. Já a região norte, possui a pior marca de pavimentação entre as regiões, atingindo apenas 23,4% de malha rodoviária em ótimo estado.

Em um país como o Brasil onde são transportados 62% de sua carga e 96% de seus passageiros através das estradas, é necessário que haja uma urgência na melhoria do sistema viário, tanto para quem exerce a atividade do transporte, quanto para todos os setores da economia e para a sociedade, buscando alcançar níveis satisfatórios de desenvolvimento (CNT, 2007).

O transporte rodoviário é o modal mais utilizado em todo o mundo, movimentando pessoas e mercadorias em estradas, ruas e rodovias, que podem ser pavimentadas ou não (GIMENES *et al*., 2015).

Para Rodrigues (2005), o transporte rodoviário é o mais simples e eficiente. E a única exigência para que esse meio de transporte funcione é a existência das rodovias. Em contrapartida, este modal apresenta um alto índice do consumo de combustível.

Rodrigues (2005) chegou ainda a destacar que como vantagens do modal rodoviário têm-se: a facilidade de substituir o veículo automotor em caso de quebra ou em caso de acidentes; é favorecido o embarque de pequenos lotes; a disponibilidade de vias de acesso é maior; maior rapidez de entrega de mercadorias e rápidos embarques de pessoas e mercadorias e partidas. Já como desvantagens têm-se: é desgastada prematuramente a infraestrutura da malha rodoviária; há um maior custo operacional e menor capacidade de cargas; nas épocas em que há colheita das safras, o trânsito tende-se a congestionar nas estradas.

2.2 Pavimento

Na maioria dos países do mundo, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento. No Brasil, aproximadamente 95% da pavimentação das estradas é feito com asfalto, e também em vias urbanas (BERNUCCI *et. al*., 2008).

Os pavimentos são estruturas construídas sobre uma fundação denominada subleito. O comportamento dessas camadas estruturais depende de suas espessuras, da rigidez, e do subleito, bem como a interação que haverá entre cada uma de suas camadas (BERNUCCI, *et. at*., 2008).

Conforme os ensinamentos de Bernucci *et. al*. (2008), há várias razões das quais o asfalto se tornou o principal composto de pavimentação, como por exemplo: proporciona um grau muito alto de união aos agregados, permitindo sua flexibilidade

controlável; é um ligante impermeável, durável e resistente, podendo sua utilização ser a quente ou emulsionado, com ou sem aditivos.

> Pavimentar uma via de circulação de veículos é obra civil que enseja, antes de tudo, a melhoria operacional para o tráfego, na medida em que é criada uma superfície mais regular (garantia de melhor conforto no deslocamento do veiculo), uma superfície mais aderente (garantia de mais segurança em condições de pista úmida ou molhada), uma superfície menos ruidosa diante da ação dinâmica dos pneumáticos, (garantia de melhor conforto ambiental em vias urbanas e rurais), seja qual for a melhoria física oferecida (BALBO, 2007, p.15).

A pavimentação tem como principal característica proporcionar aos usuários das vias, um deslocamento seguro e confortável, sendo capaz de suportar aos diversos tipos de ações que o tráfego de veículos proporciona, juntamente com ações climáticas, ou seja, garantir bom desempenho da via, diminuindo os custos operacionais e de manutenção (BERNUCCI *et. al*., 2008).

Oferecendo melhorias nas condições das vias de rolamento aos usuários, proporciona-se automaticamente a eles uma economia expressiva, levando-se em consideração que os custos de manutenção dos veículos será menor à medida que a pavimentação gere a ele menores danos (ZATARIN *et. al*., 2017).

2.2.1 Composição dos Pavimentos

Os pavimentos, em geral, são compostos basicamente pelas seguintes camadas, subleito, regularização do subleito, reforço do subleito e quando necessário, sub-base, base e revestimento. Antes de se conhecer as camadas de um pavimento é necessário que haja um pequeno conhecimento sobre o Índice de Suporte Califórnia (ISC), pois é através dele que serão obtidas as camadas do pavimento (BALBO, 2007).

2.2.1.1 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

ISC ou mais conhecido como CBR (California Bearing Ratio) é definido como valor percentual obtido por meio da relação feita entre a pressão necessária em que um pistão penetra em uma amostra de solo preparada, e a pressão necessária para que o mesmo pistão penetre uma amostra padrão de brita graduada, as mesmas profundidades (SENÇO, 2008).

De acordo com o valor de CBR de cada camada de solo e do número N (número equivalente de eixos padrões que se estima passar na rodovia) é possível efetuar o dimensionamento de cada camada do pavimento, obtendo a espessura das camadas e o material de que serão compostas (BALBO, 2007).

2.2.1.1 Subleito

O subleito é mais conhecido como a fundação da pavimentação, ou seja, é a primeira etapa de um pavimento. Em casos rotineiros onde há o projeto para se pavimentar uma estrada em que já há tráfego, exige-se a regularização com o subleito. Conforme a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2010) o solo utilizado no subleito não deve ser expansivo, ou seja, é necessário que não inche na presença de água.

> O subleito, limitado assim superiormente pelo pavimento, deve ser estudado e considerado até a profundidade onde atuam de forma significativa, as cargas impostas pelo tráfego. Em termos práticos, tal profundidade deve situar-se numa faixa de 0,60 m a 1,50 m (DNIT, 2016, p.95).

É de essencial conhecimento que o subleito deve ser executado com todos os requisitos técnicos possíveis, caso contrário pode trazer danos a toda pavimentação. Tendo em vista que o mesmo suporta toda a pavimentação, ou seja, todas as camadas irão trabalhar acima dele, sendo o receptáculo final das cargas (SENÇO, 2008).

2.2.1.2 Regularização do subleito

A regularização do subleito é uma camada de espessura irregular, construída logo acima do subleito, e sua função principal é conformá-lo de acordo com o projeto, tanto transversal como longitudinalmente. Compreende cortes ou aterros até 20 cm de espessura (SENÇO, 2008).

Conforme o autor ainda explica, a regularização deve proporcionar a superfície do pavimento características geométricas, como a inclinação transversal. Em trechos tangentes, as rampas devem ter 2% de inclinação, já em regiões em que as precipitações pluviométricas são elevadas deve ser de 3% a 4% de inclinação, e, em curvas, superelevações de acordo com o projeto.

2.2.1.3 Reforço do subleito

Reforço de subleito é uma camada estabilizada granulometricamente, assentada sobre o subleito compactado e regularizado, sendo utilizada quando se faz necessário reduzir a camada de sub-base por apresentar elevada espessura, devido à capacidade de suporte do subleito ser baixa (DNIT, 2010).

Essa camada é composta com características tecnológicas superiores a camada de regularização e inferiores às da camada de sub-base. Além disso, é característica do reforço do subleito resistir e distribuir os esforços verticais, mas não o absorvem totalmente, pois essa característica é especifica do subleito (SENÇO, 2008).

2.2.1.4 Sub-base

A camada de sub-base é construída quando não é aconselhável construir a camada da base diretamente sobre a regularização ou reforço de subleito, visando evitar problemas tecno-econômicos. A mesma poderá ser composta de material granular, tanto solo-brita como qualquer outro tipo de solo escolhido. Essa camada é

formada para prevenir o bombeamento[1] do solo do subleito para a camada de base. (FIORITI, 2007).

2.2.1.5 Base

A base é uma das camadas mais importantes que constituem o pavimento, sendo destinada a receber os esforços que o tráfego distribuirá sobre o revestimento. Deve-se considerar que a camada da base tenha um material com características tecnológicas superiores quando comparadas ao material de sub-base (MACIEL, 2007).

2.2.1.6 Revestimento ou capa de rolamento

E por fim é feita a camada de revestimento ou capa de rolamento, e é de suma importância que essa camada seja tanto quanto possível impermeável, pois dessa forma ela protege as camadas construídas abaixo da mesma. Uma vez que receberá as ações do tráfego, tem que ser durável, ou seja, resistir ao desgaste, de forma a propiciar a segurança das vias (BERNUCCI et. al., 2008).

Para o dimensionamento dos pavimentos, a camada de revestimento tem espessura adotada em relação a critérios próprios, ou em função do tráfego previsto. Para vias simples, com sentido em duas direções, é adotado de 3 a 5cm de espessura, já em rodovias em que há pelo menos duas vias de direção em cada sentido, os revestimentos chegam a ser mais espessos, variando de 7,5 a 10cm (SENÇO, 2008).

2.2.2 Classificação dos pavimentos

Os pavimentos caracterizam-se em três diferentes tipos, quanto à sua constituição e comportamento: rígidos, semi-rígidos ou semiflexíveis e flexíveis (SENÇO, 2008).

[1] O efeito de bombeamento pode carregar parte dos finos das camadas que garantem a boa resistência do solo, impactando em patologias graves no pavimento.

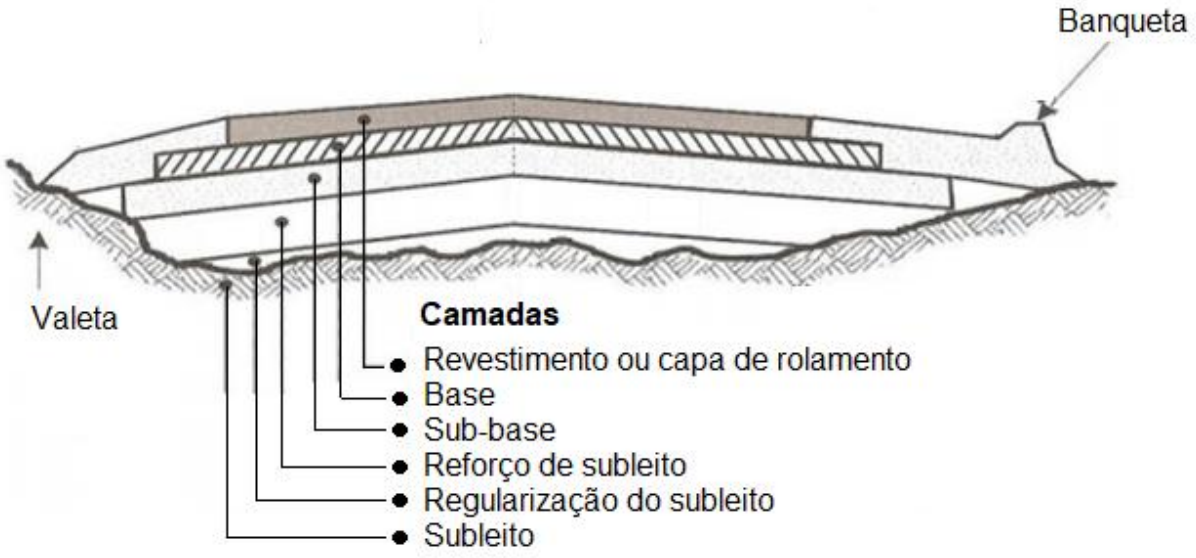
2.2.2.1 Pavimento Flexível

Conforme Pinto *et al*., (2002), pavimento flexível é todo o pavimento em que suas camadas sofrem deformações elásticas quando há aplicação de um carregamento, esforços solicitados pelo tráfego, e as cargas aplicadas são distribuídas aproximadamente uniformemente ao longo das camadas adjacentes.

Levando em consideração o tráfego local com pouca intensidade, a disponibilidade de materiais granulares de boa qualidade e custo acessível, podem ser construídos pavimentos onde há a predominância de materiais granulares. Em contrapartida a esse ponto, onde há tráfego intenso, pouca disponibilidade de materiais granulares e fundação com pouca capacidade de suporte, se faz necessário um pavimento constituído de varias camadas, e espessura significativa (BERNUCCI *et al*., 2008).

Os pavimentos flexíveis (FIG. 1) são compostos pelas camadas de subleito, regularização do subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento ou capa de rolamento (SENÇO, 2007).

Figura 1 - Camadas de um pavimento flexível.

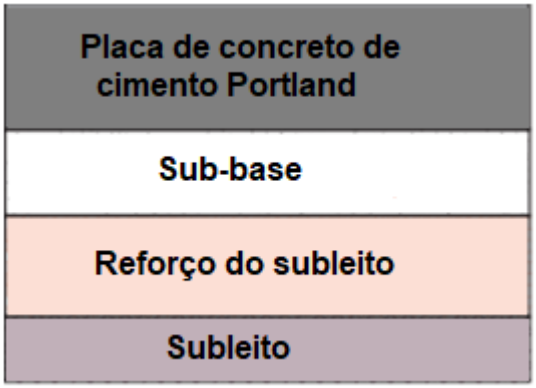


Fonte: SENÇO, 2007. Adaptado pela autora

2.2.2.2 Pavimentos Rígidos

Bernucci et al. (2008) descreve pavimentos rígidos como uma camada de cimento Portland apoiada, em sua maioria, sobre uma camada de material granular ou material estabilizado com cimento, conhecido como sub-base, estando também apoiado a uma camada de subleito ou reforço de subleito quando se faz necessário (FIG. 2).

Figura 2 - Composição do pavimento rígido.



Fonte: Bernucci *et al* (2008). Adaptado pela autora.

Conforme Senço (2007), a pavimentação rígida apresenta baixa deformação, podendo romper por tração na flexão, se solicitado por cargas e deformações.

A pavimentação rígida é conhecida também por uma camada que recebe os esforços horizontais provocadas pelo trafego, gerando pressões verticais aliviadas e bem distribuídas sobre as camadas inferiores (BALBO, 2007).

2.2.2.3 Pavimentos Semirrígido ou Semiflexível

Pavimento semirrígido ou semiflexível pode ser considerado como um tipo de pavimento intermediário, estando entre os pavimentos Rígidos e Flexíveis (BERNUCCI *et. al*., 2008).

Conforme é dito por Balbo (2007), o pavimento semirrígido deve apresentar revestimento asfáltico e uma camada de material estabilizante com ligante hidráulico, como por exemplo, uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.

“Neste tipo de pavimento é a camada de base, devido à sua elevada rigidez, que absorve a maior parte dos esforços verticais que deste modo atuam sobre o solo de fundação com valores muito reduzidos” (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2008, p. 15).

2.3 Asfalto Convencional

A produção do asfalto no Brasil iniciou-se em 1944, na refinaria Ipiranga, com petróleo proveniente da Venezuela. As principais propriedades da pavimentação com material betuminoso que levaram a adotá-lo foram: impermeabilidade, durabilidade das mistura, possibilidade de ser trabalhada a diversas temperaturas, aderência entre betume e os agregados, e em alguns casos preços mais acessíveis do que outros tipos de pavimentações (SENÇO, 2008).

Ele é caracterizado por ser um ligante betuminoso que provém do petróleo destilado e possui propriedades de um adesivo termoviscoplástico, impermeável a água e pouco reativo, não impedindo que ele sofra processo de envelhecimento por oxidação do ar e da água (BERNUCCI *et al.,* 2008).

O revestimento asfáltico mais empregado no Brasil é o concreto asfáltico, que consiste em misturar os agregados, o fíler e o cimento asfáltico de petróleo aquecendo-os em altas temperaturas. O resultado obtido será uma mistura homogênea de acordo com as especificações do projeto (BERNUCCI *et al.,* 2008).

O asfalto pode ser fabricado em usina específica, fixa ou móvel, ou até mesmo na pista de rolamento a ser pavimentada. Os revestimentos podem ser classificados de acordo com o ligante usado: a quente, com o uso de concreto asfáltico, sendo denominado concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), ou a frio, com o uso de emulsão asfáltica (EAP) (NAKAMURA, 2011).

Ainda conforme Nakamura (2011), o concreto betuminoso usinado a quente é o mais utilizado no Brasil. A composição do asfalto convencional se dá pela mistura de agregados, fíler e ligante asfáltico.

2.3.1 Agregados

O revestimento asfáltico é composto pela mistura de agregados (naturais ou artificiais) e asfalto. Visando sempre adquirir um material que ofereça o conjunto de durabilidade da pavimentação, e que ofereça ao usuário da via segurança e tranquilidade durante o seu percurso. É necessário que se escolha, assim como o asfalto, agregados de excelente qualidade (BERNUCCI, *et. al*., 2008).

> Do ponto de vista da engenharia civil, agregados são materiais inertes, granulares, sem forma e dimensões definidas, como propriedades adequadas a compor camadas ou misturas para utilização nos mais diversos tipos de obras. Aqui, o interesse maior é pelos agregados destinados aos serviços de pavimentação. Seu emprego, então, destina-se a misturas betuminosas, concreto de cimento, bases de calçamentos, lastros de obras e outros. (SENÇO, 2008, p. 265).

2.3.1.1 Agregados Naturais

Agregados naturais são aqueles provenientes da erosão, transporte e desagregação das rochas, podendo ser de origem física, variação de temperatura, como química, pela ação de ácidos e bases sobre os elementos mineralógicos. Esses agregados são utilizados como se encontram dispostos na natureza, como exemplo a areia e o pedregulho (SENÇO,2008).

Conforme Balbo (2007) afirma, em alguns casos materiais granulares naturais, como os solos concrecionados[2], também são utilizados como camadas dos pavimentos.

2.3.1.2 Agregados Artificiais

Os agregados artificiais são originados a partir de rejeitos industriais, como por exemplo, escória de alto-forno e de aciaria, ou fabricados conforme a exigência

[2] Solo cujas partículas se apresentam ligadas entre si por um cimento qualquer.

da obra com o objetivo de se ter um alto desempenho, como exemplos temos a argila calcinada [3] e a argila expandida[4] (BERNUCCI et al., 2008).

Atualmente também tem se empregado entulhos recicláveis originados de demolição e construção, bem como originários da fresagem[5] de pavimentos existentes (BALBO, 2007).

No ramo da construção civil, temos, como exemplo, a pedra britada, que representa quase a totalidade dos agregados utilizados em uma obra. Ela é considerada, na prática, um agregado artificial no que se refere à forma e dimensão. Quanto à qualidade, resistência e durabilidade, ela depende da rocha mãe, o que faz com que ela esteja bem próxima de um agregado natural (SENÇO, 2008).

2.3.3 Fíler

O Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER), 1997, afirma que fíler é um material de enchimento inerte quando comparado aos demais componentes da mistura, onde se passa pelo menos 65% na peneira de 0,075mm, considerando sua abertura de malha quadrada.

> O fíler é a fração fina original da britagem de rochas, pedregulhos ou lateritas, sendo assim possível de receber essa denominação a cal e os ligantes hidráulicos finamente moídos, como o cimento Portland e o cimento siderúrgico. Uma de suas funções, da qual decorre sua denominação, é o preenchimento parcial dos vazios formados pela mistura de agregados graúdos e miúdos (BALBO, 2008, p.102).

2.4 Asfalto Borracha

O asfalto borracha, ou asfalto ecológico, é um tipo de pavimentação em que é adicionada a borracha moída de pneus inservíveis ao ligante asfáltico antes de ser misturado aos agregados (MAZZONETTO, 2011).

---

[3] Agregado artificial obtido a partir da queima de solos argilosos.
[4] Agregados produzidos artificialmente pelo aquecimento de certas argilas em um forno, que se expandem pela retenção de gases formados, no seu interior, durante o aquecimento.
[5] É a remoção de pavimentos antes da execução de novo revestimento dos mesmos.

A adição de borracha moída de pneus ao ligante asfáltico foi uma forma nobre de resolver o descarte inadequado de pneus inservíveis, a poluição ambiental, além de melhorar as propriedades e desempenhos do revestimento asfáltico (ZATARIN et al., 2017).

2.4.1 História do Asfalto Borracha

Mundialmente falando, o asfalto borracha surgiu na década de 1960 nos Estados Unidos da América, quando Charles H. MacDonald desenvolveu uma solução para reparar as ruas de Phoenix, cidade localizada no estado do Arizona, solução essa conhecida a partir de então como método *band-aid*[6]. Desde então começou a ser empregado em vários países como China, África do Sul, Portugal e Austrália (GRECA, 2011).

Já no Brasil a utilização do Asfalto Modificado por Borracha (AMB) deu-se início em 1999 quando o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através da criação do artigo nº 2 da resolução 258/99 passou a proibir o descarte dos pneus no meio ambiente, ressaltando principalmente sua proibição de queima a céu aberto. Com isto fez-se necessário encontrar uma finalidade para os pneus inservíveis (DI GIULIO, 2007).

Em 17 de agosto de 2001, com a participação de vários colaboradores, ocorreu o primeiro teste de asfalto borracha no Brasil, no Rio Grande do Sul (FIG. 3), entre as cidades de Guaíba e Camaquã (GRECA, 2011).

[6] Tratamento superficial aplicado sobre o pavimento

Figura 3 - Primeiro trecho pavimentado com asfalto borracha no Brasil.

Fonte: Greca Asfaltos (2001)

Já na FIG. 4, temos o primeiro trecho do asfalto borracha no estado de Minas Gerais, em linha que liga Belo Horizonte ao aeroporto de confins, concluído em 2007 (GRECA, 2007).

Figura 4 - Primeiro trecho do asfalto borracha em Minas Gerais.

Fonte: Greca Asfaltos (2007)

A maior obra brasileira realizada com asfalto borracha foi construída em 2006 pela concessionária Ecovias, no estado de São Paulo, conhecida como Anchieta-Imigrantes (FIG. 5).

Figura 5 - Sistema Anchieta-Imigrantes com asfalto borracha.

Fonte: Ecovias[7], 2006.

2.4.2 Matéria-Prima

Com a criação da resolução de nº 416, de 30 de setembro de 2009 do CONAMA, a empresa produtora de pneus passa a ser responsabilizada pelos pneus inservíveis em território nacional. Segundo o artigo 3º dessa resolução, a cada pneu novo comercializado, as empresas deverão reciclar um pneu inservível. O processo de reciclagem dos pneus inservíveis vai desde sua coleta até sua destinação ambientalmente correta (MOTTA, 2008).

Desde a criação de tal resolução, o programa de reciclagem da Associação Nacional da Industria de Pneumáticos (ANIP), conhecida como RECICLANIP, vem atingindo metas satisfatórias. Nos últimos anos, conseguiu atingir metas acima do ideal da reciclagem dos pneus, utilizando como base a produção em cada ano (QUADRO 1). Em 2017, por exemplo, foram reciclados 458 mil toneladas de pneus, equivalentes a 91,6 milhões de pneus para carros de passeios (RECICLANIP, 2018).

[7] Disponível em: http://www.ecovias.com.br/institucional/sistema-anchieta-imigrantes

Tabela 1: Quadro de evolução da meta de reciclagem de pneus inservíveis.

Evolução no cumprimento da meta de destinação ambientalmente correta nacional pelos fabricantes de pneus (2009-2017)							
2009/2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
5,88%	1,79%	5,31%	6,93%	6,98%	1,17%	0,09%	1,78%

Fonte: RECICLANIP, 2018. Adaptado pela autora.

Ao chegar ao destino final, podem-se obter o pó de borracha através da moagem do pneu em usinas de reciclagem, ou em empresas responsáveis pela recauchutagem[8] de pneus. Para essa obtenção Oda e Fernandes (2002) explicam três tipos de processos:

a) Criogenia: é o processo no qual se acrescenta nitrogênio líquido a borracha moída, e após o seu congelamento é realizado um esmagamento do produto até se chegar a granulometria desejada.
b) Regeneração: é o processo em que há uma extração por solvente, onde é separada a borracha dos demais componentes, como metais, tecidos, entre outros. Os pedaços moídos de pneu são submetidos a vapores d'água junto com produtos químicos, como os álcalis e óleos minerais, até que o produto chegue ao desejado.
c) Moagem a frio: é o processo de obtenção mais utilizado e barato, onde há a moagem do pneu e sua peneiração. Após esse processo ele será submetido a imãs que retiram as partes de metais metálicas restantes.

2.4.3 O Problema dos pneus inservíveis

Conforme é descrito pelo Sistema Nacional de Aprendizagem no transporte (SENAT, 2017), no Brasil, cerca de 450 mil toneladas de pneus são descartadas por ano. Isso equivale a aproximadamente 90 milhões de unidades. Eles se tornam um problema quando não são descartados corretamente. Segundo a ANIP (2018), nos

[8] Processo em que se reconstrói o pneu aproveitando sua estrutura resistente gasta (lisa), e incorpora-lhe nova borracha, de forma a ser reutilizado.

últimos 10 anos o descarte correto dos pneus evitou que 3,7 milhões de toneladas fossem parar em locais indevidos.

Ao chegarem ao fim de sua vida útil, os pneus podem seguir os seguintes caminhos: reuso, descarte e reciclagem. Conforme ensina Araujo e Silva (2005), reuso é a forma encontrada para que um pneu possa ser utilizado novamente, passando apenas por um processo de reforma denominado recauchutagem. Em pneus de automóveis não é comum a utilização da recauchutagem, tendo em vista que os consumidores preferem adquirir um pneu novo. Já em caminhões e ônibus, o reuso dos pneus é muito comum, tendo em vista que o preço dos pneus novos para esses tipos de veículos são elevados.

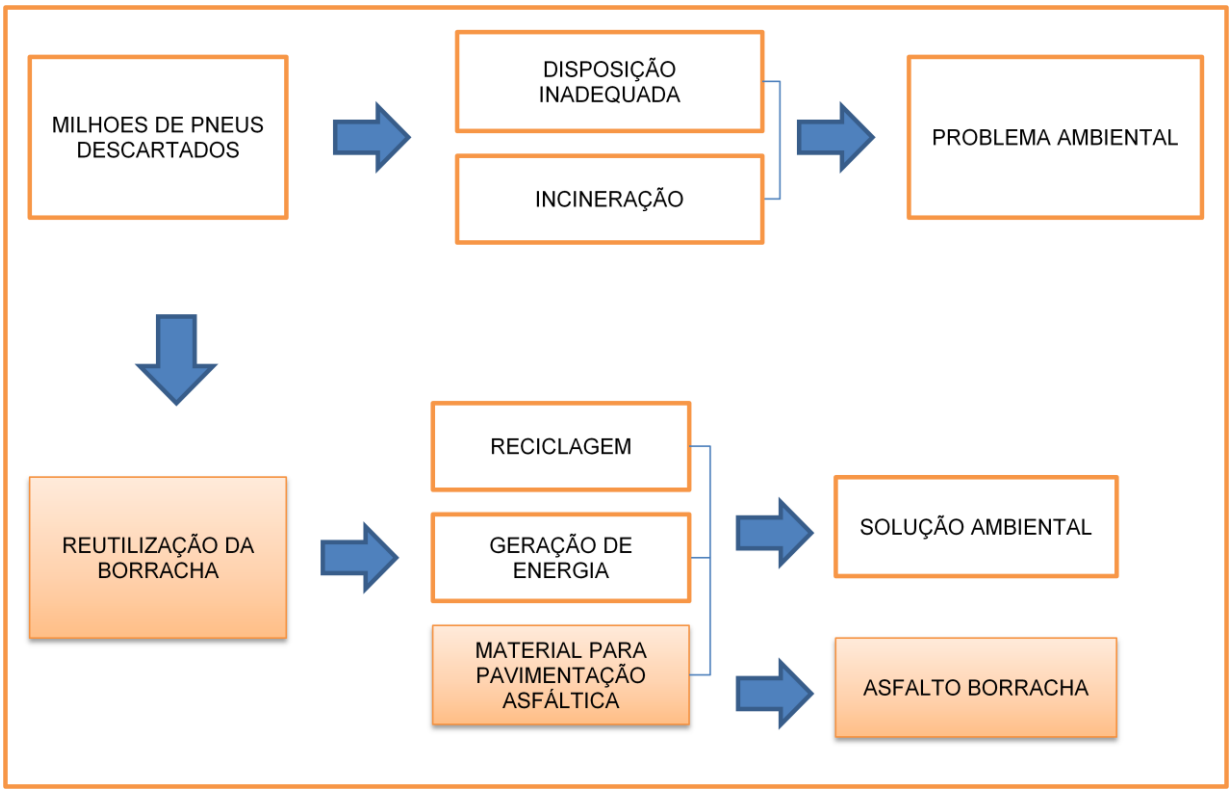
Descarte é, em sua maioria, realizado em áreas como córregos e lixões, gerando impacto ambiental. Por isso, se faz necessário a reciclagem do material ou sua destinação ambiental correta, onde há o reaproveitamento desse material (ARAUJO e SILVA, 2005).

A reciclagem é um conjunto de tecnologias criadas para reaproveitar resíduos gerados, em sua maioria, em escala industrial. Pode-se entender como um reaproveitamento dos pneus para finalidades diferentes das quais é projetado e consumido (ARAUJO e SILVA, 2005).

Quando há o descarte irregular dos pneus, a probabilidade da proliferação de mosquitos é grande, tendo em vista que são agentes transmissores de doenças. Há também grandes riscos de ocorrência de incêndios, causando a contaminação do ar com sua fumaça altamente tóxica, e o óleo que é produzido na sua queima infiltra e contamina o lençol freático. Sua disposição em aterros sanitários dificulta a compactação do solo, diminuindo a vida útil dos aterros (ODA, 2001).

Através do fluxograma (FIG. 6), Oda (2001) apresenta os meios de reutilização dos pneus descartados, e suas consequências ao meio ambiente:

Figura 6 - Fluxograma de reaproveitamento de pneus descartados.



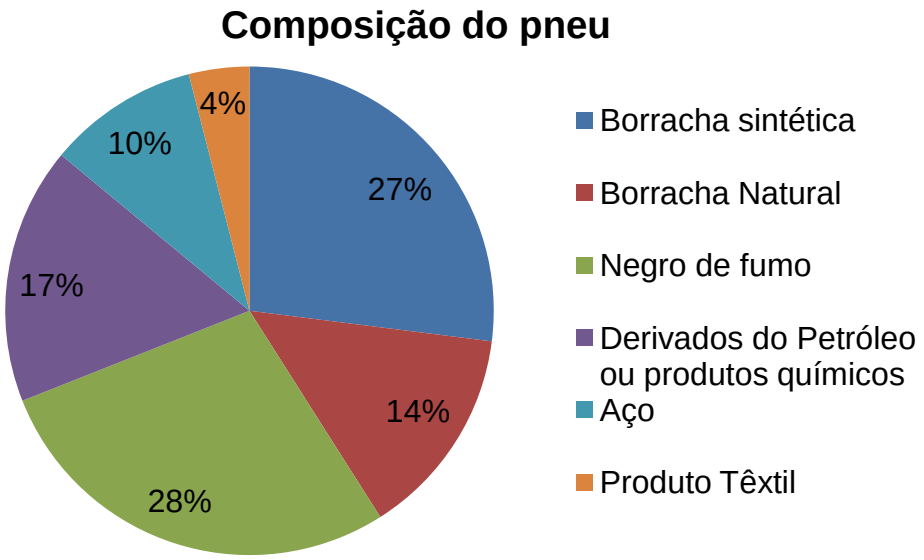
Fonte: ODA, 2000. Adaptado pela autora.

2.4.4 Adição da borracha de pneu ao asfalto

De Oliveira *et al*. (2007), propõe que a solução mais promissora para os pneus inservíveis é fazê-lo voltar para as estradas, porém sob a forma de asfalto.

Conforme o Sindicato Nacional da Indústria de Pneumáticos, Câmaras de ar e *Camelback* (SINPEC, 2018), um pneu comum de passeio é composto pelos seguintes materiais: 27% de borracha sintética, 14% de borracha natural, 28% de negro de fumo, 17% derivado de petróleo ou produtos químicos, 10% de aço e 4% de produto têxtil (FIG. 7).

Figura 7 - Gráfico de composição do pneu.



Fonte: Próprio autor

A borracha de pneu é composta pela mistura das borrachas natural e sintética e pelo negro de fumo. A borracha natural, proveniente do látex, irá proporcionar ao ligante asfáltico sua principal característica, elasticidade; enquanto a borracha sintética, que provém de produtos químicos como petróleo ou gás natural, proporciona sua estabilidade térmica. O negro de fumo, produzido pela combustão incompleta do petróleo, proporciona ao ligante mais resistência, além da coloração dos pneus (RESENDE, 2004).

Ao ser retirado do meio ambiente, os pneus inservíveis que são aproveitados para pavimentação vão para as indústrias, onde passarão por um processo em que serão triturados e moídos, separando-os dos pedaços de fibra e aço, aproveitando apenas o pó da borracha (ZATARIN *et al*., 2017).

De acordo com Wickbolt (2005), a borracha moída traz ao pavimento diversas melhorias quando misturada ao ligante convencional, sendo elas: incorporação de agentes antioxidantes[9] e inibidores da ação de raios ultravioleta que ajudam na diminuição do envelhecimento do pavimento, aumento significativo da resistência de produtos químicos como óleo e combustíveis, diminuição da sensibilidade térmica,

[9] Responsáveis por diminuir substancialmente o processo de oxidação do pavimento

aumento da deformação elástica instantânea e diminuição das deformações permanentes.

Ainda como descreve o autor, a forma mais usual de se adicionar a borracha ao ligante asfáltico se da pelo processo de via úmida. Nesse processo, inicialmente, a borracha será misturada ao ligante, modificando-o permanentemente. Dessa forma, a transferência de suas características de elasticidade e resistência serão mais efetivas para o ligante asfáltico.

De acordo com Mazzonetto (2011), o meio de mistura da borracha de pneus ao asfalto se dá por um processo em que se adiciona de 5% a 20% de borracha ao ligante asfáltico, durante um período de 20 a 120 minutos, variando sua temperatura de 150 e 200ºC. O ligante obtido pode se dar de várias formas, pois ele depende do tipo de pneu a ser moído, da granulometria das partículas e da porcentagem da borracha (FIG. 8).

Figura 8 - Processo de fabricação do asfalto borracha.

Fonte: Infraestrutura Urbana, 2011. Adaptado pela autora.

A introdução da borracha no asfalto convencional por meio do processo úmido é realizada no Brasil através de um sistema chamado *terminal blend*[10]. Nesse sistema, o asfalto borracha pode ser estocado por aproximadamente 6 horas, uma vez que a mistura é feita por potentes agitadores (DNIT, 2009).

Segundo De Oliveira *et al.* (2007), os fabricantes do asfalto borracha prometem alguns benefícios, como uma maior aderência, redução sensível dos ruídos de atrito e uma maior durabilidade do asfalto.

2.5 Vantagens do uso do asfalto borracha

Comparando inicialmente as características físicas do asfalto borracha e asfalto convencional, um dos aspectos mais relevantes é o surgimento de deformações superficiais no asfalto, como as trincas e fissuras. Conforme explicado por Bernucci *et. al.* (2008), os pavimentos constituídos com o asfalto borracha têm maior resistência às deformações decorrentes do trincamento, quanto às deformações que são permanentes, provenientes das rodas dos veículos. Isso ocorre pois, quando é adicionada a borracha moída dos pneus as misturas asfálticas, as mesmas irão adquirir a capacidade elástica decorrente da borracha. Dessa forma, quando há tráfego na pavimentação, irá se deformar e logo após voltará a sua formação inicial, diminuído as deformações indesejáveis.

A empresa Greca Asfaltos (2009) afirma que, quando fabricado em usinas, o asfalto borracha tem menor probabilidade de envelhecer, diminuindo o surgimento de trincas, fazendo com que essa pavimentação tenha maior tempo de vida, ou seja, com menos manutenções.

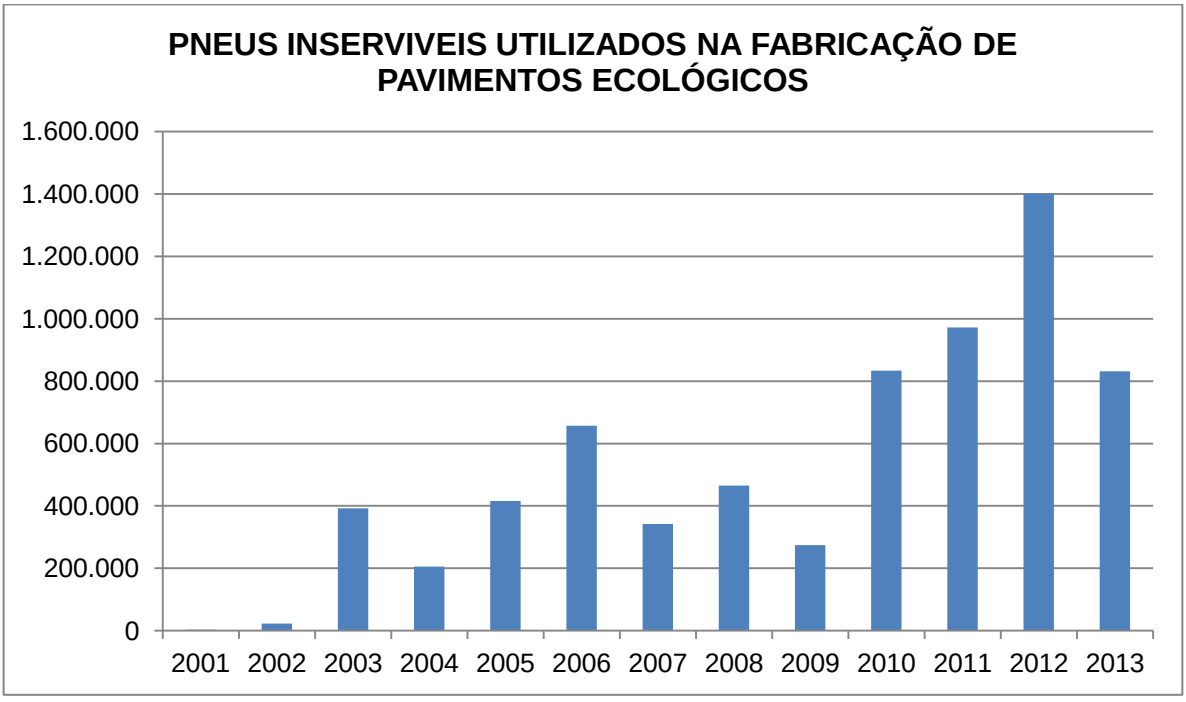
Após a realização de um ensaio - no ano de 2005 -, entre a resistência do asfalto borracha e o asfalto convencional, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), chegou à conclusão de que o asfalto borracha resiste de 5 a 6 vezes mais ao surgimento de trincas. Neste ensaio, foi utilizado um simulador de tráfego adquirido pela universidade juntamente com o Departamento Autônomo de Estradas e Rodagens (DAER), que constatou trincas no asfalto convencional após 90 mil ciclos do simulador; já no asfalto borracha ocorreram trincas após 500 mil ciclos do simulador (GRECA, 2014).

[10] Asfalto produzido em unidade industrial

A concessionária CCR Rodonorte vem utilizando pavimentos ecológicos desde 2002 e afirma que esse tipo de pavimento tem maior durabilidade e oferece maior conforto aos passageiros em suas viagens. Conforme observação da empresa, esse tipo de pavimento faz com que haja menor ruído de atrito entre pneu e asfalto, e a menor movimentação dos veículos quando submetidos à água de chuva. Essas vantagens, citadas acima, apresentam 50% de economia quando comparado ao asfalto convencional (ZATARIN *et al*., 2017).

Entre 2001 a 2013 já haviam sido retirados do meio ambiente mais de 6,6 milhões de unidades de pneus que foram utilizados para a fabricação do pavimento ecológico. O ápice se deu em 2012, com quase 1,5 milhões de pneus reaproveitados (FIG. 9), sendo que para cada tonelada de asfalto fabricado, são adicionados aproximadamente 150 kg de borracha em sua mistura, ou seja, a cada 1 km de sua produção, cerca de 1000 pneus são utilizados (GRECA, 2014).

Figura 9 - Pneus inservíveis utilizados na fabricação de asfalto ecológico.



Fonte: GRECA ASFALTOS, 2014. Adaptado pela autora.

Para ressaltar uma vantagem econômica que o asfalto borracha oferece, foi estudado um treco de 30 km, revestido com uma camada de 3,5 cm de espessura de asfalto borracha, que equiparada ao asfalto convencional, com as mesmas

características de resistência e estabilidade, são usados 5 cm de espessura. Após serem analisados esses tipos de revestimentos, chegou-se a uma diferença de 7.875 toneladas de asfalto. O consumo total de asfalto convencional utilizado foi de 26.250 toneladas, já o de asfalto borracha atingiu a marca de 18.375 toneladas (GRECA, 2009).

A empresa pioneira em asfaltos comprovou, através dos estudos, que o custo, usinagem e aplicação do asfalto borracha chegaram a ser de 15 a 20% maior do que o asfalto convencional. Demonstram através da Tabela 2, que quando comparado à massa asfáltica, usada no mesmo trecho, o custo total da pavimentação com o asfalto borracha se torna menor.

Tabela 2: Custo comparativo entre asfalto convencional e asfalto borracha

Grandezas		Cálculo	Unidades	Tipos de Asfalto	
				CAP 50/70	AMB
A	Quantidade de massa asfáltica produzida no CBUQ	-	Ton.	26.250,00	18.375
B	Custo de aplicação/usinagem por tonelada de CBUQ aplicado	-	R$/Ton	200,00	230,00
C	Quantidade de massa x custo de usinagem/aplicação	AxB	R$	5.250.000,00	4.226.250,00
D	Teor de Asfalto	-	% Peso	5,00	5,50
E	Custo de asfalto por tonelada	-	R$/Ton	1.150,00	1.550,00
F	Custo de Asfalto no CBUQ	AxDxE	R$	1.509.375,00	1.566.468,75
G	Custo total na obra	C+F	R$	6.759.375,00	5.792.718,75

Fonte: Greca Asfaltos, 2009. Adaptado pela autora.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através das pesquisas realizadas nesse trabalho, pode-se chegar à conclusão de que o uso do asfalto borracha é vantajoso, destacando-se os aspectos econômicos e ambientais.

Levando-se em consideração o aspecto econômico, o custo final de uma obra com o asfalto borracha é menor, além de ser mais durável que o asfalto convencional, fazendo com que os gastos com manutenções sejam menores.

Já no aspecto ambiental, o asfalto borracha passou a ser um grande aliado no que diz respeito ao descarte de pneus inservíveis no meio ambiente, tendo em vista que, anualmente, milhares de pneus são descartados de forma irregular na natureza, causando danos irreparáveis. A partir de sua fabricação, os pneus passam a ter destinação ambientalmente correta, evitando danos ao meio ambiente.

Por fim, percebe-se que o asfalto borracha é uma grande alternativa para uso em pavimentação, o que falta é uma maior divulgação de suas vantagens. Assim seriam necessários à continuação de estudos mais aprimorados para que autoridades se convencessem de que é a melhor forma para a pavimentação atual, promovendo assim, a sua utilização em órgãos públicos e privados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANIP. **Produção da Indústria Brasileira de Pneus em 2018.** Disponível em <http://www.anip.org.br/> Acesso em: 21 de setembro de 2018

ABCP. **Pavimentos Intertravados:** Preparo da Fundação. Disponível em <http://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2012/08/ManualPavimentoIntertravado.pdf> Acesso em 26 de setembro de 2018.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica:** materiais, projeto e restauração. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 560p. v1.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; SOARES, J. B.; CERATTI, J. A. P. **PAVIMENTAÇÃO ASFALTICA:** FORMAÇÃO BÁSICA PARA ENGENHEIROS. 1ª ed. Rio de Janeiro: Petrobrás Abeda, 2007. 501p. v1

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS L. P. **Pavimentos Rodoviários.** 2ª Ed. Coimbra: Almedina, 2008. 388p. v1

BRASIL. República Federativa do Brasil. **Programa de Metas de Juscelino Kubitscheck.** Rio de Janeiro, 1965.

CNT. **Rodovias Federais.** Disponível em <http://www.cnt.org.br/> Acesso em 21 de setembro de 2018.

_____.**DNER-EM 367/97**. Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **DNIT 138/2010.** Pavimentação – Reforço do subleito. Rio de Janeiro, 2010.

_____.**DNIT 111/2009.** Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending”. Rio de Janeiro, 2009.

DI GIULIO, Gabriela. Vantagens ambientais e econômicas no uso da borracha em asfalto. **Inovação Uniemp.** Campinas, v.3 n.3, p. 12-15, maio/jun 2007.

DE OLIVEIRA, Otávio José; DE CASTRO, Rosani. **Estudo da destinação e da reciclagem de pneus inservíveis no Brasil.** 2007. 9f. Artigo Científico. Bacharel em Engenharia de Produção - Universidade Estadual Paulista, 2007.

FARIA, A. C.; COSTA, M. F. G. **Gestão de custos logísticos: custeio baseado em atividades, balanced scorecard, valor econômico agregado**. 1. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2005. 448p. v1.

FIORITTI, C, F. **Pavimentos Intertravados de Concreto Utilizando Resíduos de Pneu como Material Alternativo**. 2007. 218f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GIMENES, A, M.; OLIVEIRA, H, X.; FERNANDES, J, P, V.; BOSSA, D. **Estudo de Caso do Transporte Rodoviário.** 2015. 16f. Artigo Científico - Faculdade INESUL(Instituto de Ensino Superior de Londrina). Londrina, Paraná. 2015.

GRECA. **Grupo Greca Asfaltos.** Disponível em: <http://www.grecaasfaltos.com.br/artigos-e-links> Acesso em 20 de setembro de 2018.

RIBEIRO, P, C, C.; FERREIRA, K, A. **Logística e Transporte: Uma discussão sobre os modais de transporte e o panorama brasileiro.** 2002. 8f. Artigo Científico – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais. 2002

MAZZONETTO, Caroline. Asfalto borracha. **Revista Infraestrutura Urbana**. v.11. Dez 11. Disponível em <http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/16/pavimentacao-asfaltica-os-tipos-de-revestimentos-o-maquinario-necessario-260588-1.aspx> Acesso em 09 de Outubro de 2018

MOTTA, F, G. **A cadeia de destinação dos pneus inservíveis – o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico**. 2008. 19f. Artigo Científico - Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo. Campinas, São Paulo, 2008.

NAKAMURA, Juliana. Pavimentação Asfáltica. **Revista Infraestrutura Urbana**. v.16. Dez 11. Disponível em <http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/16/pavimentacao-asfaltica-os-tipos-de-revestimentos-o-maquinario-necessario-260588-1.aspx> Acesso em 07 de Outubro de 2018

ODA, Sandra. **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto Borracha em Obras de Pavimentação**. 2000. 280f. Tese (Doutorado em Transportes) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

ODA, S.;FERNANDES Jr., J.L. **Utilização de borracha de pneus como material para pavimentação asfáltica.** 2002. 11f. Artigo – Universidade Estadual de Maringá. Maringá, Paraná, 2002.

PINTO, S. PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis**. Rio de Janeiro, 2ª ed. 269p. 2002.

PUPO, Fábio. **Entrevista concedida pelo direto das Ecovias**. São Paulo, 2011.

RODRIGUES, R. M. **Estudo do trincamento dos pavimentos**. 2005. 208f. Tese de Doutorado em Engenharia - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

RECICLANIP – Programa de Reciclagem da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. Disponível em <http://www.reciclanip.org.br/> Acesso em 28 de setembro de 2018.

RESENDE, E, L. **Canal de distribuição reverso na reciclagem de pneus:** Estudo de caso. 2004. 118f. Tese de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007. 761p. v 1.

ZATARIN, A, P, M.; SILVA, A, L, F.; ANEMAM, L, S.; BARROS, M, R.; CHRISOSTOMO, W. **Viabilidade da pavimentação asfáltica com asfalto borracha.** 2017. 26f. Artigo Científico - Universidade de Sorocaba. Sorocaba, São Paulo, 2017.