

**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia Automotiva**

**ESTUDO DA ADESÃO DE BANDAS DE RODAGEM  
NA RECAUCHUTAGEM DE PNEUS**

**Autor: Edward Douglas de Melo Pereira Júnior  
Orientador: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Sandra Maria da Luz**

**Brasília, DF  
2015**



**EDWARD DOUGLAS DE MELO PEREIRA JUNIOR**

**ESTUDO DA ADESÃO DE BANDAS DE RODAGEM NA RECAUCHUTAGEM DE PNEUS**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sandra Maria da Luz

**Brasília, DF  
2015**

### **CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

Douglas de Melo Pereira Júnior, Edward.  
Estudo de Adesão de Bandas de Rodagem Na Recauchutagem  
de Pneus / Edward Douglas de Melo Pereira Júnior. Brasília:  
UnB, 2015. 103 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília  
Faculdade do Gama, Brasília, 2014. Orientação: Sandra Maria da  
Luz

1. Pneu. 2. Recauchutagem. 3. Adesão.  
Maria da Luz, Sandra. Prof. Dr.

CDU Classificação



## **ESTUDO DA ADESÃO DE BANDAS DE RODAGEM NO RECAUCHUTAGEM DE PNEUS**

**Edward Douglas de Melo Pereira Júnior**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_ apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Sandra Maria da Luz, UnB/ FGA**  
Orientador

---

**Prof<sup>o</sup> Dr Rodrigo Munõz, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

---

**Prof<sup>o</sup> Dr Volker Franco Steier, UnB/ FGA**  
Membro Convidado



Dedico o presente trabalho primeiramente a Deus. Aos meus pais Douglas e Graça e ao meu irmão Edward. Que são e sempre foram minha base.

## **RESUMO**

Os pneus inservíveis se tornaram, devido à significativa quantidade existente no mundo, um sério problema ambiental. Com vista neste cenário, inúmeras medidas são utilizadas para reduzir os impactos negativos e agregar valor ao material que seria descartado. Neste trabalho serão apresentadas algumas técnicas de reciclagem e reutilização de pneus inservíveis em uso na atualidade com ênfase na recauchutagem. A metodologia utilizada nesse artigo teve como base o levantamento de bibliografia sobre processos de reciclagem e reutilização de pneus além de detalhes técnicos do processo industrial da recauchutagem de pneus. São escassas na literatura informações sobre o desempenho mecânico e térmico nas novas bandas de rodagem inseridas no pneu usado. Desta forma, este trabalho tem por objetivo propor e testar alguns métodos de caracterização mecânica e térmica dos pneus recauchutados. Tendo em mãos um método comparativo e eficiente para as colagens, o processo de recauchutagem será mais facilmente fiscalizado, mensurado e otimizado. Uma maior aceitação do condicionamento de pneus pelo mercado promoveria impactos positivos diretos ao meio ambiente assim como vantagens econômicas aos usuários de transporte rodoviário.

**Palavras-chave:** Recauchutagem, Pneu, Caracterização Mecânica e Térmica.

**ABSTRACT**

The scrap tires have become a serious environmental problem due to the significant quantity in the world. Because of that, numerous measures have been used to reduce the negative impacts and add value to the material that would be discarded. The objectives of this study are: Presenting the recycling and reuse practices of scrap tires in use today with emphasis on retreading, investigating parameters amenable of changes along the industrial process that could improve the bonding process of the new tread. The methodology used in this article was based on a survey of literature on recycling processes and tire reuse as well as technical details of the manufacturing process of tire retreading. Furthermore, from the detection of the variables that affect the quality of the new tread's adhesion, we propose a method for a specimen's mechanical and thermal test. Having an efficient comparative method for collages, the retreading process will be more easily monitored, measured and optimized. Greater acceptance of tire reconditioning by the market promotes direct positive impact on the environment as well as economic benefits to road transport users.

**Keywords:** Retreading, Tire, Thermal and Mechanical Characterization

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Estrutura do Pneu. ....	14
Figura 2: Etapa de Reparos na Recauchutagem de Pneus.....	27
Figura 3: Vista em Perspectiva do Corpo de Prova. ....	29
Figura 4: Vista Lateral do Corpo de Prova.....	29
Figura 5: Representação em 2D do Corpo de Prova.....	30
Figura 6: Máquina de Ensaio Universal.....	31
Figura 7: Equipamento de Análise Térmica. ....	33

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Composição Química do Pneu. Fonte: (Andrietta, 2002).....	17
Tabela 2: Materiais da Estrutura do Pneu. Fonte: (Andrietta, 2002).....	17
Tabela 3: Avaliação das Destinações dos pneus inservíveis.....	23
Tabela 4: Cronograma de Atividades Para TCC 2.....	33

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>10</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 Contextualização.....	11
1.2 Motivação e justificativa .....	11
1.3 Objetivo .....	13
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>13</b>
2.1 Partes e Estrutura do Pneu .....	13
2.2 Composição do Pneu .....	16
2.3 Produção de Pneus no Brasil .....	18
2.4 Reciclagem de Pneus.....	18
2.5 Vantagens e desvantagens dos métodos de reciclagem de pneus .....	22
2.6 Recondicionamento de pneus .....	24
<b>3 METODOLOGIA DE TRABALHO .....</b>	<b>28</b>
3.1 Confecção de Corpos de Prova.....	28
3.2 Teste de Resistência Mecânica.....	30
3.3 Caracterização térmica da região de adesão .....	32
3.4 Cronograma.....	33
<b>4 BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>34</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

A vida útil do pneu de um veículo automotivo normalmente é dada em função da distância máxima que este pode ser utilizado em segurança, no caso do Brasil é normalmente expresso em quilômetros. Esta estimativa é feita baseada em inúmeras variáveis que impactam o processo de corrosão natural da superfície do pneu tais como materiais da estrutura, perfil do asfalto, carga média do veículo e condições ambientais. Em média, são trocados os 4 pneus de um veículo a cada 40 mil km rodados. Isso significa que se considerarmos um veículo com vida útil de 500 mil km, 50 pneus são descartados no meio ambiente ao longo de sua vida.

Considerando o fato de que o Brasil possui transporte de carga e passageiros predominantemente rodoviário, o acúmulo de pneus inservíveis é um problema ambiental de alta gravidade. A situação é ainda mais grave devido a dificuldade de se reciclar o pneu tendo em vista que é um material compósito de base termofixa (borracha) adicionado de alto índice de negro de fumo e outros produtos químicos que impedem a fluidez do composto.

Mesmo com tamanha dificuldade, muitas são as alternativas para reciclagem ou reutilização dos pneus inservíveis. Dentre elas destaque-se a queima do material como forma de obtenção de energia. Também é possível misturar material particulado em soluções químicas industriais, em concreto e asfalto, montagem de estruturas com pneus inteiros como móveis ou barreiras de demarcação esportiva e, no melhor dos casos, o condicionamento para que pneus antes inservíveis voltem a circular de forma a renovar sua vida útil (NEHDI; KHAN, 2011).

### 1.2 Motivação e justificativa

O condicionamento de pneus se apresenta como uma alternativa de alto valor ambiental e econômico para o suprimento da malha rodoviária por ser vantajosa nos aspectos econômicos e ambiental. O método de condicionamento mais utilizado na atualidade é chamado de recauchutagem. Neste processo, pneus chegam à indústria com a superfície já desgastada onde passa por etapas de purificação, reparos, raspagem, e colagem da nova banda de rodagem além de testes que

podem garantir a confiabilidade no retorno dos pneus ao mercado (BODZIAK, 2008).

O impacto causado por resíduos sólidos advindos da intensa atividade industrial vem, cada vez mais, chamando atenção de autoridades do meio ambiente. O grande desafio para as indústrias é encontrar formas de descarte viáveis, éticas e, quando possível, rentáveis. Por falta de meios para este processo, em muitos setores os resíduos acabam ocasionando problemas ambientais de contaminação, degradação e elevados custos na contenção dos impactos.

No Brasil a situação é grave mesmo quando se compara a outros países em desenvolvimento, muito se necessita fazer para a eficiente deposição dos resíduos sólidos. A diminuição na geração de resíduos é a melhor alternativa para enfrentar o problema, uma vez que em 75% das cidades no Brasil seus resíduos sólidos são disponibilizados em lixões. “É preciso inverter a pirâmide, o que significa colocar em prática a desejável política dos “3 Rs”(Reduzir, Reusar e Reciclar) e não continuar produzindo e gerando mais resíduos” (PEREIRA e TOCCHETTO, 2007).

Quando se tratando de pneus a situação é crítica. O ministério dos transportes estima que 58% do transporte de produtos agrícolas e industriais seja realizado por meio do transporte rodoviário. É estimada uma produção nacional de aproximadamente 58 milhões de pneus/ano. Pneus importados também protagonizam o mercado com um quantitativo de mais de 20 milhões de unidades anualmente o que representa cerca de 40% do produzido nacionalmente (ANIP, 2015).

Devido também as más condições de boa parte das rodovias nacionais que gera desgaste prematuro dos pneus, quase metade do total consumido é descartado naquele mesmo ano. Este montante impacta diretamente no meio ambiente, o que gera uma demanda pelo desenvolvimento de práticas eficientes de reuso, reciclagem e descarte do material (CNT 2007).

Apesar da situação crítica, o Brasil está hoje em segundo lugar mundial na prática de recauchutagem de pneus, conferindo-lhe credibilidade junto a vários países que lutam pela preservação do meio ambiente. Além de aumentar a vida útil do pneu, o processo de recauchutagem representa ainda, uma economia de energia estimada em 80% de energia e matéria-prima em comparação à produção de pneus novos.

Entretanto, poucas são as técnicas de acreditação da recauchutagem e por se tratar de um processo delicado, pequenas irregularidades no processo industrial podem resultar em pneus de baixa vida útil ou até mesmo perigosos. O presente trabalho tem por objetivo propor um método de teste de adesão da colagem da banda de rodagem. Deste modo, características mecânicas e térmicas na área de adesão serão determinadas.

### 1.3 Objetivo

O presente projeto tem por objetivo estudar os mecanismos de adesão entre o pneu e uma nova banda de rodagem no processo de reutilização dos pneus por recapeamento.

Objetivos específicos para o TCC 1

- Estudar a linha de produção que garante a qualidade no processo de recondicionamento de pneus que é dividida em fases, sendo elas:
  - A triagem dos pneus recebidos pela empresa garantindo que todos estejam em condições para o recapeamento;
  - Processo de purificação do pneu evitando impurezas e umidade;
  - Identificação e devido reparo das falhas encontradas nos pneus;
  - Processo fino de raspagem garantindo alto potencial de aderência na etapa de colagem;
  - Matéria-prima de qualidade nas bandas de rodagem utilizadas.
- Propor método de teste de colagem a partir de ensaios mecânicos e térmicos para ser realizado no TCC 2.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### 2.1 Partes e Estrutura do Pneu

Por definição, pneus são envoltórios elásticos e deformáveis capazes de se conectar à jante das rodas de certos veículos e que protegem o envolvimento de uma câmara de ar. Nos veículos automotivos, os pneus são parte do sistema de rodagem e são os responsáveis pelo contato direto com o solo para transmissão dos

esforços de aceleração e frenagem através de sua aderência com o solo. Para suportar os esforços e solicitações de trabalho, uma série de estruturas deve ser contida no compósito do pneu (INMETRO, 2012). A Figura 1 apresenta a estrutura do pneu convencional e a seguir é explicada cada parte do pneu com relação aos números destacados na Figura 1.



Figura 1: Estrutura do Pneu.

Fonte: (MICHELIN, 2015)

## 1. Revestimento interno

Este revestimento tem função análoga a uma câmara de ar. É feita de borracha sintética e é a barreira direta para o estanque do ar no interior do pneu (MICHELIN, 2015).

## 2. A carcaça

Confeccionada por filamentos (têxteis ou de aço), a estrutura da carcaça é flexível e se engasta na borracha, formando assim os arcos retos que tem sua completa fixação ao se enrolar no aro dos talões. Sobre a carcaça, as lonas remanescentes e camadas de borracha do pneu são aplicadas (CONTINENTAL,

2015). Dentre as funções básicas da carcaça estão a de assegurar o bom funcionamento da suspensão em variadas cargas, velocidades e pressões, contribuir com estabilidade e conforto aos ocupantes do veículo e auxiliar para o bom rendimento do pneu

### **3. Zona baixa**

A zona baixa impede a deformação brusca do pneu em ocasiões de aceleração e travagem da roda garantindo a eficiência da transmissão de potência do veículo para a zona de contato com o solo (MICHELIN, 2015; POPULAR MECHANICS, 2012).

### **4. Aro de talão**

É a estrutura que ajusta o pneu de forma fixa para possibilitar o encaixe perfeito com a roda. É formado por um filamento de aço inextensível de seção transversal e comprimento variável. Segundo as especificações do pneu a estrutura se fixa por enrolamento da parte inferior da carcaça. As principais funções desta estrutura são de fixar o pneu à roda, vedar o pneu na calibração e transmitir potência do motor do veículo em situações de aceleração e frenagem (CONTINENTAL, 2015).

### **5. Flanco**

O flanco é a cobertura lateral dos pneus que se posiciona entre a banda de rodagem e os talões. O flanco determina a altura do pneu. Suas principais funções são relacionadas ao suporte de carga do veículo, ao suporte de flexões mecânicas, a resistência aos impactos, fricções e agressões no trajeto e também participação na estabilidade e conforto do veículo (POPULAR MECHANICS, 2012).

### **6. Lonas de topo**

Trata-se de filamentos metálicos revestidos de borracha que, posicionados sobre a carcaça formam uma cintura que fornece resistência mecânica ao pneu sob a velocidade da força centrífuga. Estes filamentos se cruzam com os da carcaça anteriormente citada gerando triângulos indeformáveis, que garantem a rigidez do topo (POPULAR MECHANICS, 2012). As principais funções desta camada são de

Impedir deformações sob o efeito da centrifugação, controlando assim o diâmetro do pneu nas mais variadas condições de utilização e resistir a esforços de deriva sem que sua rigidez impeça a deformação elástica na superfície do pneu diante de descontinuidades no perfil do solo (MICHELIN, 2015).

## **7. Banda de rodagem**

É a estrutura em contato direto com o solo. É formada por uma camada de borracha extremamente resistente de face repleta de ranhuras. Nesta área de contato com o solo, os esforços solicitados à estrutura são muito grandes (MICHELIN, 2015). As funções da banda de rodagem são de garantir aderência entre o pneu e o solo nas mais variadas condições, durar um longo período através da resistência ao desgaste e agressões, auxiliar no conforto acústico, especialmente em curvas e auxiliar na dirigibilidade do veículo (POPULAR MECHANICS, 2012).

## **8. Ombro**

São estruturas laterais que servem de união entre flancos e banda de rodagem. É normalmente produzida do mesmo material utilizado na banda de rodagem, porém com maior espessura por ser uma região crítica na absorção de impactos (CONTINENTAL, 2015). A maior parte das falhas de fixação das bandas de rodagem são iniciadas por falhas no ombro que se propagam (SHEN, 2014).

### **2.2 Composição do Pneu**

A borracha natural pura não apresenta todas as características demandadas aos pneus. Portanto, é combinada a componentes como borracha sintética, negro de fumo, óleos minerais, enxofre e por fim, alguns aceleradores do processo que são feitos a base de enxofre (OLAZAR, 2008).

Os elementos presentes na composição bem como os componentes e as proporções de cada material empregado na construção de pneus utilizados para automóveis, ou seja, uso leve e para carga, em caminhão e ônibus são apresentadas respectivamente nas Tabelas 1 e 2:

Tabela 1: Composição Química do Pneu. Fonte: (ANDRIETTA, 2002).

<b>Elemento / Composto</b>	<b>% em massa</b>
Carbono	70,0
Hidrogênio	7,0
Óxido de Zinco	1,2
Enxofre	1,3
Ferro	15,0
Outros	5,5

Tabela 2: Materiais da Estrutura do Pneu. Fonte: (ANDRIETTA, 2002).

	<b>Automóvel</b>	<b>Caminhão</b>
<b>Material</b>	<b>% em massa</b>	<b>% em massa</b>
Borracha / Elastômeros	48	45
Negro de fumo	22	22
Aço	15	25
Tecido de nylon	5	-
Óxido de zinco	1	2
Enxofre	1	1
Aditivos	8	5

De acordo com o Tabela 2, observar-se a participação considerável de negro de fumo (22%). Ele é incorporado à borracha para aumentar a resistência mecânica dos pneus, e é considerado o grande problema para a indústria de pneus pois dificulta muito a reciclagem, e está presente em percentuais semelhantes tanto em pneus de automóveis como em caminhões. Além do Negro de fumo, a própria borracha base do pneu é de difícil reciclagem por se tratar de um polímero termofixo.

O reprocessamento de polímeros termofixos é de alta dificuldade devido a sua natureza reticulada. Quando possível, demanda a utilização de altas temperaturas ou componentes químicos extremamente tóxicos e danosos ao meio ambiente (KAI, 2014).

### 2.3 Produção de Pneus no Brasil

A confecção de pneus no Brasil é hoje realizada por 5 fabricantes distintos: Bridgestone, Goodyear, Pirelli, Bridgestone, Firestone, Michelin e Continental. As comercializações realizadas por estas empresas no mercado brasileiro tem como público alvo três segmentos: montadoras, reposição e exportação, sendo que aproximadamente 26% das vendas destinam-se ao mercado em montadoras e 42% para lojas revendedoras de pneus e 32% para as exportações, sendo efetuadas em sua maioria para os Estados Unidos, França, Argentina e México (ANDRADE, 2007).

Por se tratar de um país em que 58% do transporte de produtos agrícolas e industriais é realizado por meio de transporte rodoviário, a demanda de pneus é extremamente alta. Não bastando a grande produção nacional já citada, pneus importados também representam parte considerável do mercado com um quantitativo de mais de 20 milhões de unidades anualmente o que representa cerca de 40% do produzido nacionalmente (ANIP, 2015).

### 2.4 Reciclagem de Pneus

O Brasil produz um passivo ambiental de pneus usados que estima-se em 100 milhões de carcaças, sendo 40% geradas no estado de São Paulo. “As tecnologias mais comuns para dar destino aos pneus descartados são a recauchutagem, a regeneração, a reciclagem energética, a pirólise, a composição asfáltica, além de diversas formas de reutilização” (SANDRONI e PACHECO, 2005).

Devido os altos índices de descarte e dificuldade em se reciclar os materiais dos pneus, este processo depende de técnicas, meios de transporte e armazenagem com um grande custo financeiro para as empresas. Requer também grande conexão entre fabricantes, empresas de recapagem, consumidores de

energia térmica, geração de energia térmica, consumidores de artefatos de borracha e seus subprodutos (MARCHIORI, 2002).

Dentre os principais métodos de reciclagem pode-se citar o acondicionamento, a desvulcanização da borracha, a pavimentação asfáltica, o coprocessamento para obtenção de energia e pirólise para a obtenção de óleo e gás.

Para a desvulcanização da borracha do pneu, a primeira exigência do processo é a separação total da borracha vulcanizada de todos os outros agregados como metais e tecidos por exemplo. O tecido de nylon pode ser reaproveitado como reforço em embalagens de papelão e os metais podem ser vendidos como sucata (BOLSA DE RECICLAGEM FIEP, 2001); (BONENTE, 2005)

Enfim, a desvulcanização da borracha altera os resíduos, os tornando mais plásticos e pronto para receber um novo processo de vulcanização. Ainda que possam novamente passar pelo processamento, não mantêm as propriedades da borracha crua. Sendo assim, são misturados na borracha na produção de novos produtos de menor exigência técnica como tapetes, quadras esportivas, sinalizadores de trânsito, rodízios para móveis, tiras para indústria de estofados, câmaras de ar, etc. (BONENTE, 2005); (BOLSA DE RECICLAGEM FIEP, 2001).

Para a produção de pavimentação asfáltica, são dois os métodos utilizados na inclusão de borracha de pneus nos materiais asfálticos: O úmido (*wet process*) e o processo seco (*dry process*) (KAMIMURA, 2002). Ambos demandam orracha particulada de pneus inservíveis.

No processo úmido, um novo ligante denominado asfalto-borracha é criado a partir junção da borracha particulada no cimento asfáltico sendo modificado permanentemente devido à imersão prévia da borracha ao ligante (FREITAS, 2010). O particulado pode ser adicionado numa proporção de 5 a 25% do peso total do material ligante (KAMIMURA, 2004)

No processo seco, partículas maiores passam a constituir o agregado da mistura (FREITAS, 2010). Com acréscimo de borracha, o concreto asfáltico modificado é o novo composto proveniente desta mistura (BERTOLLO, 2000). Neste processo, a borracha representa uma proporção consideravelmente menor que no

processo úmido podendo variar de 1% a 3% do peso total do composto (KAMIMURA, 2004).

O asfalto borracha é uma potencial alternativa na reciclagem de pneus inservíveis. Entretanto desvantagens como o custo, a falta de noção exata da durabilidade e benefícios em se utilizar desta mistura junto ao asfalto tradicional, ainda não é utilizado em larga escala no Brasil. Presume-se que com melhores técnicas de testes e maiores incentivos do serviço público esta aplicação se tornaria mais popular no país (KAMIMURA, 2004).

A energia contida em um pneu é equivalente a 9,4 litros de petróleo no processo de incineração para geração de energia térmica, de acordo com o Compromisso Empresarial para Reciclagem (Cempre), organização mantida por 15 grandes empresas como Coca-Cola, Mercedes-Benz, Ambev e Gessy Lever. Estima-se que no Brasil, algo em torno de 500 mil pneus, todo mês, poderiam ser utilizados como combustível. Esse total é equivalente a 4,7 milhões de litros de óleo cru.

Sugimoto (2004) afirmou que alimentação de fornos em fábricas de cimento seria uma excelente destinação para estes pneus já que são preparados com tecnologias para conter a poluição. Na Europa por exemplo, a demanda destas indústrias é de cerca de 40% dos pneus inservíveis para abastecimento de seus fornos, substituindo o carvão.

A incineração de pneus como alternativa ao carvão possibilita entre outras, vantagens como: eliminação de todo o material do pneu inservível, não deixando resíduo; alta demanda de pneus descartados; economia de combustíveis fósseis; não demanda pré-processamentos; e sua queima produz relativamente menos emissões quando comparado ao carvão (KAMIMURA, 2002).

Já a pirólise é o processo em que se eleva a temperatura dos pneus acima de 1000°C em um compartimento de pressão abaixo da atmosférica e com baixo ou elevado teor de oxigênio. Apesar do superaquecimento, a borracha não entra em combustão. A fração de óleo contida em associações orgânicas do material exalada em forma líquida e as demais estruturas são liberadas na forma de gases voláteis (SALINI, 2000).

O óleo resultante deste processo pode ser aproveitado na indústria química e até como alternativa ao petróleo nas petroquímicas. Já o gás serve para retroalimentar a próprio processo de pirólise a partir do aquecimento da caldeira formando um ciclo de geração e utilização do gás (SANDRONI, PACHECO, 2005).

Os processos citados demandam a separação dos componentes do pneu ou a trituração antes de sua utilização além da combustão ou dissociação do material em alguns casos. No entanto, existem outros métodos de se reutilizar pneus inservíveis em sua forma inteira contribuindo para a questão da destinação final deste resíduo. Estes métodos são muitas vezes utilizados por apresentar menor complexidade na execução e menor custo no processo. Alguns destes processos estão listados a seguir:

**Preenchimento de Aterros:** pneus picados ou inteiros podem substituir parte do agregado com baixo custo e mantêm o solo com boa drenagem (RAMOS, 2005, p. 47);

**Sistemas de drenagem:** pneus unidos formando tubos em substituição aos bueiros; adotado nos EUA com resultados satisfatórios (KAMIMURA, 2002, p. 26);

**Muros de contenção:** estruturas horizontais de pneus interligados com alças de metal, usados para estabilização de taludes com muros de contenção (KAMIMURA, 2002, p. 19);

**Recifes artificiais:** pneus são aglomerados com uma mistura de cimento para serem lançados sobre o leito do mar, formando recifes artificiais (KAMIMURA, 2002);

**Armazenamento de água:** pneus cortados ao meio são dispostos em camadas sob gramados de campos esportivos. Auxilia na redução de gastos com irrigação através do armazenamento de água da chuva (KAMIMURA, 2002);

**Construção de casas “Earthship”:** Técnica que utiliza pneus e solos prensados que, fixados ao solo, confeccionam paredes (KAMIMURA, 2002, p. 34);

**Limitação e segurança de Território Esportivo:** muros de limitação para prática de esportes automotivos de alta velocidade formados por pneus engastados ao solo (RAMOS, 2005,

**Barragens:** pneus inteiros são utilizados para construção de barragens (SALINI, 2000)

**Quebra-mares:** pneus protegem os portos e marinas dos impactos das marés, gerando estabilidade para o solo marinho e para a praia, possibilitando também a estabilização de dunas (SANDRONI, PACHECO, 2005)

**Contenção de erosão:** Pneus inteiros associados a plantas de raízes grandes podem ser utilizados para ajudar na contenção da erosão do solo (CARVALHO, 2003)

**Aterros:** Pneus são amarrados com fitas de poliéster servindo de matéria-prima para a construção de aterros (CARVALHO, 2003);

**Vasos, móveis e utensílios:** utilização de pneus inteiros como matéria prima na confecção de vasos, móveis e utensílios domésticos (KAMIMURA, 2002);

**Compostagem:** Cortado em pedaços de 5 cm, a borracha do pneu pode servir para aeração de compostos orgânicos na produção de adubo (CEMPRE, 2000);

**Parques infantis e playground:** Utilização de pneus como amortecedores de impacto, obstáculos ou mesmo brinquedos em parques infantis (CARVALHO, 2003);

## 2.5 Vantagens e desvantagens dos métodos de reciclagem de pneus

Caponero (2000) analisou algumas das principais tecnologias de reciclagem em uso na atualidade, apresentando detalhes na implementação de cada uma. A Tabela 3 apresenta um compilado destes resultados desde a demanda de pneus no processo até as vantagens e desvantagens da técnica. É importante ressaltar, que as técnicas de condicionamento não foram estudadas pelo autor e como uma delas (a recauchutagem) é o foco deste trabalho, será posteriormente explicada em detalhes.

Tabela 3: Avaliação das Destinações dos pneus inservíveis. Fonte: (CAPONERO, 2000)

<b>Destino</b>	<b>Demanda de pneus</b>	<b>Principais vantagens</b>	<b>Principais desvantagens</b>
Aterro	Ilimitado	Baixo investimento de capital.	Formato Pneu. Risco de incêndio. Proliferação de insetos e roedores.
Coprocessamento em cimenteiras	Muito alta	Diminuição do nível de poluentes.	Suprimento da demanda. Adaptação dos fornos.
Pirolise	Atualmente é desprezível.	Geração de produtos mais valorizados.  Alto potencial mercadológico do produto.  Tratamento de grandes pneus.	Falta de normalização de produtos.
Agricultura	Desprezível	Sem efeitos adversos ao meio ambiente.	Baixa demanda.
Artesanatos / Recifes / Quebra ondas / Barreiras	Muito baixa.	Sem efeitos adversos ao meio ambiente.	Alto custo de disposição do pneu.
Industria civil	Muito alta.	Melhora as propriedades do asfalto.  Sem efeitos adversos ao meio ambiente.	Necessidade de pré-tratamento.  Não se mostrou viável até o momento.
Desvulcanização	Baixa	Recuperação parcial das propriedades da borracha.  Sem efeitos adversos ao meio ambiente.	Pior propriedade dos produtos  Alto investimento de capital.  Falta normatização aos produtos.
Coprocessamento em industrias de papel	Média	Diminuição do nível de poluentes.	Necessidade de pré-tratamento
Coprocessamento em termelétricas	Baixa	Combustão completa dos pneus.  Diminuição do índice de emissão dos poluentes gasosos.	Suprimento da demanda.  Alto investimento de capital.

Pode-se aferir da Tabela 3 que os aterros possuem a maior capacidade de absorção de pneus descartados dentre as opções estudadas, apesar de apresentar riscos e inconvenientes na implantação que os tornam viáveis apenas em áreas isoladas. O coprocessamento em cimenteiras possui vantagens de apelo ambiental e alta demanda sendo viável para locais com alto escoamento de pneus inservíveis. A indústria civil já possui experimentações de resultados otimistas quanto a qualidade de produtos com incorporação de borracha como nos estudos de Thomas Blessen (2008) sobre incorporação da borracha em concreto. Porém a viabilidade econômica desses processos ainda são questionáveis. As demais alternativas apresentam menor demanda e necessitam de um estudo mais delicado do custo-benefício para a sua implementação.

## 2.6 Recondicionamento de pneus

No recondicionamento, a reforma de pneus é o meio mais viável de se reaproveitar os pneus desgastados. Neste processo um pneu dado como inutilizado passa por uma série de processos industriais que permitem a reutilização do mesmo, muitas vezes com vida útil similar a de um pneu original. Dois são os métodos de recondicionamento: A primeira é a remoldagem, que reconstrói desde a banda de rodagem até a superfície de seus flancos; e a recauchutagem, na qual o pneu é restaurado apenas pela instalação de uma nova banda de rodagem. Para que o recondicionamento seja realizado, exige-se condições mínimas dos pneus para garantir a segurança do produto final (MACEDO, 2008).

Os dois processos serão melhor descritos a seguir:

**Remoldagem:** Com o objetivo de se fabricar um produto competitivo com a indústria de pneus novos, foi desenvolvida esta tecnologia que permite a reconstrução de pneus inservíveis. Neste processo, é removida toda a borracha das carcaças usadas e uma nova camada é recolocada na estrutura. A remoldagem entrega um produto até 50% mais barato que o mesmo pneu novo e portanto, agrega forte potencial econômico. Vale ressaltar que a remoldagem não utiliza de qualquer emenda e a junção da nova borracha na antiga carcaça é feita a partir de vulcanização, o que promove confiabilidade e segurança no uso. Entretanto, fabricas e revendedores de pneus novos contra argumentam o fato de que não se pode

saber a procedência dos pneus anteriores, o que afeta diretamente na qualidade do remoldado (MACEDO, 2008).

Para um processo eficiente de remoldagem é imprescindível a utilização de carcaças em bom estado. Devido ao estado deplorável das rodovias brasileiras e a excessiva rodagem dos pneus nacionais, dificilmente estas carcaças serão obtidas no mercado interno. A matéria-prima ideal para este segmento é proveniente dos EUA e Europa, por apresentarem maior qualidade devido às boas condições de suas rodovias. Entretanto desde 2007, o Brasil impede a entrada de pneus usados alegando que possuem vida útil bastante reduzida além de ser resíduo de difícil destinação e potencial causador de dano ao meio ambiente (LAGARINHOS, 2012).

**Recauchutagem:** O processo de recauchutagem é o tema alvo neste trabalho. Considerando a altíssima viabilidade da técnica, se faz necessário estudos contínuos para melhoria da qualidade do produto final. A colagem da banda de rodagem necessita ser precisa e de extrema resistência de forma que falhas nesta camada não apareçam durante o período considerado como vida útil do pneu recauchutado. Para tanto, é necessária a consideração de todos os parâmetros em todas as etapas do processo industrial visando redução de custos de produção e melhoria da colagem.

Neste processo aproveita-se da estrutura resistente do pneu usado, estando este em condições mínimas exigidas, incorpora-se então uma nova banda de rodagem. Estima-se que este método pode ser usado uma vez para pneus de veículos pequenos, de duas a três vezes em pneus pesados, e até dez vezes para pneus de avião (BODIAK, 2008). Desta forma, o pneu mantém suas características técnicas similares ao pneu em sua forma original, porém com valor consideravelmente inferior. É possível que se tenha uma economia de cerca de 75%, tanto no nível de matéria-prima, como energético, o que garante um saldo econômico e ambiental extremamente positivo. Para que se tenha segurança em sua utilização, duas condições se fazem necessárias: cumprimento das especificações do fabricante; e que o seu processo de confecção com excelência no padrão de qualidade (ANDRADE, 2007).

Apesar da economia considerável associada aos pneus recauchutados, muitos consumidores, especialmente de veículos de passeios, relutam em utilizá-los por ser mais comum o aparecimento de defeitos antecipados ao indicado como vida útil. Fatores como processo industrial inadequado e condições críticas de uso podem ocasionar defeitos principalmente na união da banda de rodagem/carcaça iniciando-se por falha dos ombros. Dessa forma, é de fundamental importância o estudo de processos mais aprimorados e técnicas mais eficazes para acreditação do processo de recauchutagem (SHEN, 2014).

O processo de produção dos pneus exige extremo cuidado para que o produto final não seja comprometido por problemas como contaminações do ambiente. A colagem ineficaz da banda de rodagem, falha na vulcanização causada pelo excesso de umidade no material podem ser problemas encontrados. Para isso, as empresas investem em otimizar a logística do processo no interior da fábrica, em novas tecnologias que agilizam e tornam mais eficientes as recauchutagens, em qualificação da mão de obra e na utilização de materiais de qualidade.

Assim que a matéria-prima chega à fábrica, uma etapa de fundamental importância é a inspeção inicial. A inspeção utiliza equipamentos de alta tecnologia para realizar esta tarefa como as máquinas de inspeção por pressão, ultrassonografia, indução elétrica, sherografia e outras (ABR, 2015).

Após aprovação na inspeção inicial, o pneu segue para a preparação da carcaça. Nesta fase molda-se a superfície do pneu para permitir o ideal processo de colagem nas etapas seguintes. Ocorre então a raspagem do pneu através de um torno semiautomático que garante a simetria superficial (ABR, 2015)

O pneu é então novamente examinado e tem seus danos pontuais reparados para que haja a eliminação de toda contaminação ainda existente. Após realizar cada um dos serviços, uma averiguação visual é rigorosamente feita. É então aplicada a cola como suporte para a aplicação da nova banda de rodagem (ABR, 2015) A Figura 2 mostra um exemplo desta etapa.



Figura 2: Etapa de Reparos na Recauchutagem de Pneus

Fonte: (PNEUS DO ALCAIDE, 2015)

Antes mesmo de sua colocação no pneu, a banda de rodagem já pode ser preparada, a borracha é então aplicada a superfície raspada do pneu. Por fim, o conjunto é roletado com a temperatura adequada (ABR, 2015)

Para finalizar o processo de reforma do pneu, o conjunto é colocado dentro de uma câmara de borracha e montado em uma espécie de roda, para então ser posicionado no interior de uma autoclave. São encaixados por ordem de tamanho de forma que os pneus de maior porte sejam os primeiros a entrar, dessa forma a circulação de ar é otimizada no interior do equipamento. A temperatura de trabalho utilizada na autoclave determinará o tempo que o processo vai demorar. Sensores termopares são responsáveis por equalizar e verificar constantemente as condições no interior da máquina. Com o término do processo, tem-se a perfeita incorporação da nova banda de à sua devida carcaça, sendo enviado para sua ultima etapa, a inspeção final (ABR, 2015)

Tendo finalizado todo o processo de reforma o produto é novamente inspecionado a partir dos mesmos critérios e parâmetros usados na primeira inspeção e nas intermediarias do processo. Vale lembrar a responsabilidade desta verificação é alta pelo fato de que se aprova for, o pneu será comercializado e utilizado pelo consumidor final cuja segurança será de responsabilidade da indústria retificadora.

### 3 METODOLOGIA DE TRABALHO

O presente trabalho pretende testar e comparar a colagem da banda de rodagem em pneus recauchutados. Para isso, serão utilizados corpos de prova retirados de pneus previamente recauchutados com variação em determinado(s) parâmetro(s) dentre os controláveis no processo industrial. Para isso, algumas etapas serão seguidas nesta metodologia. A primeira seria a confecção de um corpo de prova ideal para o processo de testes. Desta forma então será necessário determinar os detalhes do processo de teste de resistência mecânica da colagem e, por fim, a metodologia para realizar testes relacionados a estabilidade térmica da área colada e também o nível de cura.

#### 3.1 Confecção de Corpos de Prova

Especificações físicas do corpo de prova como o formato, medidas e velocidade de tensionamento, são normalmente definidas pela normas técnicas vigentes como a ABNT. Entretanto, pelo fato de o pneu como um todo ser um compósito que inclui além de borracha outros componentes como metais e nylon, a ABNT não fornece normas para corpos de prova de pneus em que se considere toda a estrutura.

Para solucionar esse problema, será utilizado corpo de prova com dimensões similares aos já utilizados para ensaios de pneus e registrados na literatura. Dessa forma, o comprimento do corpo de prova será de 89,00 mm, a largura de 25,4 mm e a espessura correspondente a do pneu após recauchutado (SCHUBEL, 2004).

Entretanto, o grande desafio desta proposta é desenvolver uma técnica para que o teste qualifique a colagem e, portanto, o esforço crítico e predominante do teste precisa ser cisalhante e direcionado na união entre a banda de rodagem e a carcaça. Para isso, a alternativa será, utilizando um arco de serra, cortar manualmente a face superior e inferior do corpo de prova mantendo um espaçamento pré-determinado. Os cortes serão realizados da superfície externa até a colagem colada em ambos os lados. Desta forma tem-se a criação de tensão cisalhante na superfície intermediária entre os cortes cuja resposta aos testes determinaria o resultado da medição.

As Figuras 3, 4 e 5 mostram um esquema do corpo de prova que se deseja obter. As cores, Escala e perfil das faces foram propositalmente alteradas na Figura para permitir uma melhor visualização e entendimento da proposta.

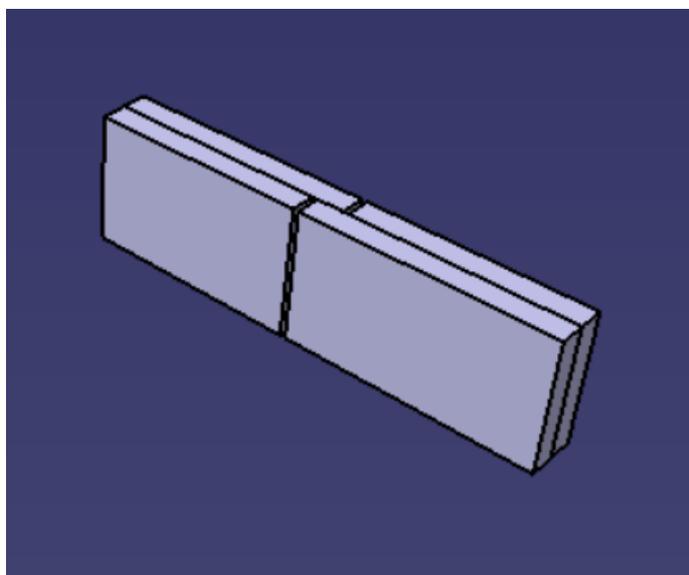


Figura 3: Vista em Perspectiva do Corpo de Prova.

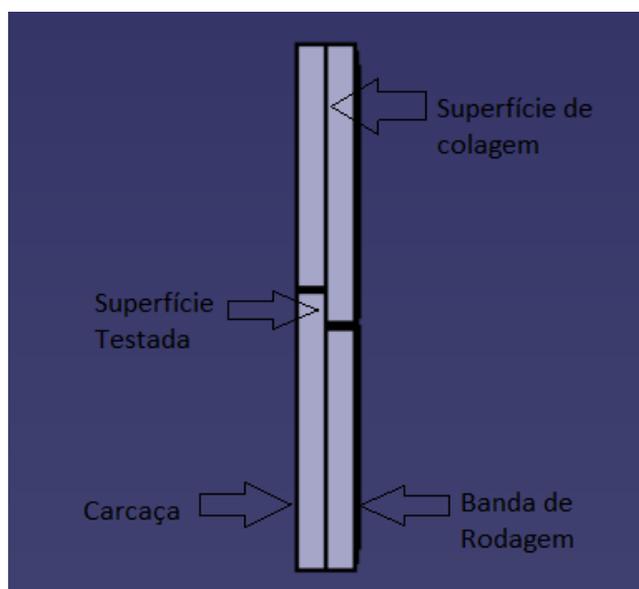


Figura 4: Vista Lateral do Corpo de Prova

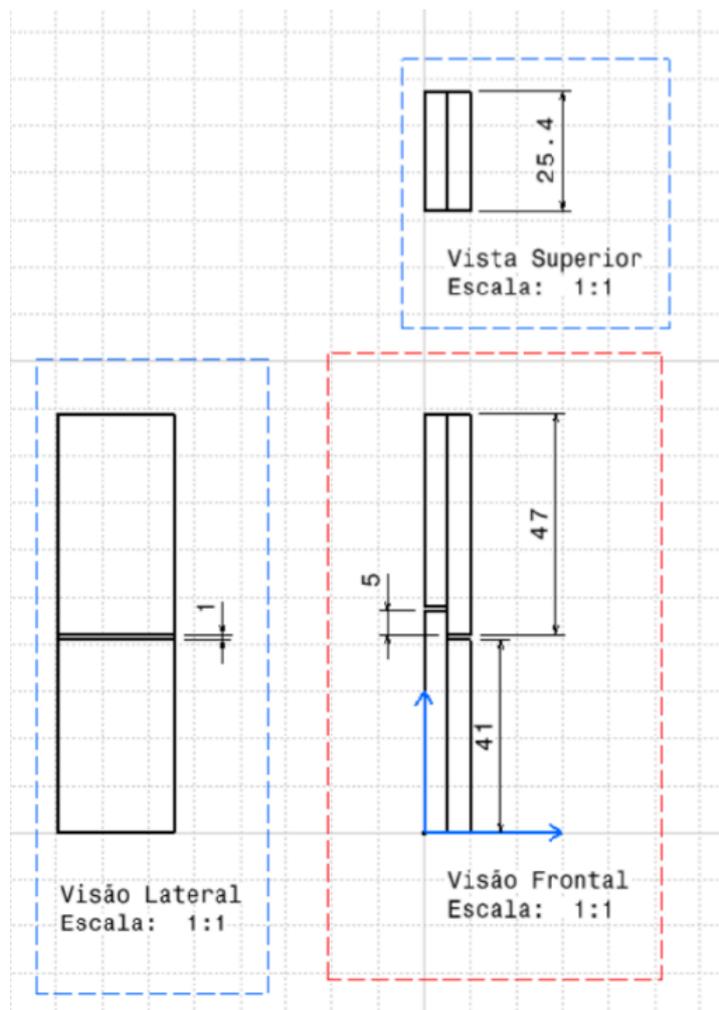


Figura 5: Representação em 2D do Corpo de Prova

### 3.2 Teste de Resistência Mecânica

Para testes de resistência mecânica do corpo de prova, será realizado o ensaio de tração. Vale ressaltar que tração não é o esforço primordial solicitado aos pneus durante o funcionamento padrão sendo este o de fadiga por solicitações cíclicas. Apesar deste fato, o ensaio de tração oferece uma praticidade e uniformidade nos resultados que o torna mais usual quando o principal objetivo é comparar amostras.

O Ensaio de Tração é de grande utilidade no levantamento de dados básicos sobre a resistência de materiais e como um teste de aceitação de materiais que se faz pela comparação das propriedades determinadas pelo ensaio e alterações especificadas em projeto. O ensaio é realizado a partir da aplicação de uma carga

uniaxial crescente a um corpo de prova especificado, ao mesmo tempo em que é medida sua deformação.

O equipamento utilizado para os testes será a máquina universal de ensaios de modelo INSTRON 8804 de fabricação inglesa (Figura 6). Com Pressão de trabalho de até 207 bar e célula de carga com capacidade máxima de esforço dinâmico de até 100 kN. Tem suas características satisfatórias de acordo com as normas da ASTM e ABNT.



Figura 6: Máquina de Ensaio Universal.

O Corpo de prova será então posicionado nas garras do equipamento e tracionado até que haja o rompimento do mesmo. Espera-se que o esforço cisalhante resultante da adaptação feita no corpo de prova seja capaz de garantir que

a ruptura deste ocorra na superfície de colagem. Os gráficos tensão deformação serão então aferidos para todos os corpos de prova disponíveis e os resultados comparados levando em conta as diferenças empregadas propositalmente no processo de recauchutagem.

### 3.3 Caracterização térmica da região de adesão

A caracterização térmica de materiais submetidos a alta temperatura de trabalho é essencial.

Pelo fato de não haver normatização para a geometria das amostras utilizadas para a caracterização térmica, estas serão recolhidas dos corpos de prova previamente rompidos nos ensaios de tração. Desta forma essa metodologia economiza material no processo de teste.

Os procedimentos que serão realizados serão respectivamente a Termogravimetria (TG) avaliando com este a degradação do material em função da temperatura aplicada levando em consideração situações de funcionamento em situações críticas. Para tal, será utilizada uma tempera inicial ambiente a razão de aquecimento de 10 °C/min até 500 °C, em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 100 mL/min. Estes parâmetros foram baseadas estudos prévios de caracterização de elastômeros de borracha (DALL`ANTONIA, 2009). Simultaneamente será realizada uma Calorimetria Explanatória (DSC) na qual será estudado o comportamento do material relativo à sua absorção de energia, Neste será utilizada uma variação de temperatura ambiente a 300°C com a mesma razão de aquecimento seguindo os padrões utilizados por Martins (2008) para caracterização de borracha natural.

O equipamento que será utilizado para ambos os testes será o equipamento de anlise térmica da marca TA Instruments modelo SDT Q600 (Figura 7). Esta se mostra vantajosa por ser oferecer a opção de realizar os dois testes citados simultaneamente, economizando tempo e material no processo.



Figura 7: Equipamento de Análise Térmica.

### 3.4 Cronograma

A partir das informações levantadas e metodologia desenvolvida no TCC 1, pode-se estimar um cronograma para as atividades a serem realizadas no TCC 2. A tabela abaixo apresenta o período de realização de cada atividade prevista a partir de Janeiro até Julho de 2016:

Tabela 4: Cronograma de Atividades Para TCC 2.

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho
Obtenção de Material	X	X					
Preparação de Corpos de Prova			X				
Ensaio				X			
Análise de Resultados e comparação com a literatura				X	X	X	
Apresentação do TCC 2							X

#### 4 BIBLIOGRAFIA

ABR, Associação Brasileira De Recauchutadores, 2015. Disponível em <<http://www.abr.org.br/dados.html>>

ALMEIDA, M.C. Estudo do Ciclo de Vida do Pneu Automotivo e oportunidade para disposição final de pneus inservíveis. In: KAMIMURA, Eliane. Potencial dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil. Dissertação de Mestrado De Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2002.

ANDRADE, Hered de Souza. Pneus Inservíveis: Alternativas Possíveis De Reutilização/ Hered de Souza Freitas – Florianópolis 2007.

ANDRIETTA, Antonio J. Pneu e meio ambiente: um grande problema requeruma grande solução. 2002.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. São Paulo. ANIP em números. Disponível em: <[www.anip.com.br](http://www.anip.com.br)>

BODZIAK, William. Tire Tread and Tire Track Evidence: Recovery and Forensic Examination Practical Aspects of Criminal & Forensic Investigations, 2008.

CAPONERO, J.; LEVENDS, Y. A.; TENORIO, J. A. S. Análise crítica das tecnologias aplicadas à destinação final de pneus. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, ABM, 2000, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 2593-2606, 2000.

CARVALHO JR., J.A; LACAVA, P.T. Emissões em processos de combustão. Editora UNESP, 2003.

CEMPRE - Compromisso empresarial para reciclagem. Pneus. Ficha Técnica 8, 2000. Disponível em: <<http://www.cempre.org.br/fichas/ficha8.html>>

CONTINENTAL. Tyre Basics Passenger Car Tyres, 2008. Disponível em: <[http://www.continentaltyres.com.au/www/download/tyres\\_au\\_en/general/downloads/download/reifengrundlagen\\_en.pdf](http://www.continentaltyres.com.au/www/download/tyres_au_en/general/downloads/download/reifengrundlagen_en.pdf)>

DALCIN, Gabrieli Bortoli. Ensaios dos Materiais. Santo Ângelo, 2007. Disponível em: < [http://www.urisan.tche.br/~lemm/arquivos/ensaios\\_mecanicos.pdf](http://www.urisan.tche.br/~lemm/arquivos/ensaios_mecanicos.pdf) >

DALL`ANTONIA. Caracterização Mecânica e Térmica da Borracha Natural Formulada e Vulcanizada dos Clones GT 1, IAN 873, PB235 e RRIM 600. Polimeros. 2009.

FREITAS, Sidcléa Sousa de. Benefícios sociais e ambientais do coprocessamento de pneus inservíveis: estudo de caso na cidade de João Pessoa-PB / Sidcléa Sousa de Freitas. 2010.

GOLDENSTEIN, Marcelo. Panorama Da Indústria De Pneus No Brasil: Ciclo De Investimento, Novos Competidores E A Questão Do Descarte De Pneus Inservíveis,.. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/conhecimento/bnset/set2504.pdf>>. 2007.

IBAMA – Destinação de pneus inservíveis, Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/publicadas/brasil-destina-85-dos-pneus-inserviveis>>. INMETRO, Procedimento de fiscalização – Pneus novos. Portaria Inmetro 05/2000 – Código 3051. 2012

KAI, yu. Reprocessing and recycling of thermosetting polymers based on bond exchange reactions. Disponível em: RSC Advances, 2014.

KAMIMURA, Eliane. Potencial dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis. 2004.

LAGARINHOS, Carlos A. F. Reverse logistics for post-consumer tires in Brazil Disponível em: Polímeros, 2012

MARTINS, M. A.; GONÇALVES, P. S.; MATTOSO, L. H. C. Caracterização térmica da borracha natural de clones IAC da série 400 da cidade de Jaú em São Paulo. 2008.

MICHELIN. O que compõe um pneu? Disponível em: <<http://www.michelin.pt/pneus-turismo/conselhos/tudo-sobre-o-pneu/o-que-compoe-um-pneu>>

MACEDO, D. G. Compósitos de serragem de madeira e resíduos de recauchutagem de pneu. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

NEHDI, M; KHAN, A. Cementitious Composites Containing Recycled Tire Rubber: An Overview of Engineering Properties and Potential Applications. 2001.

OLAZAR, Martin Catalyst effect on the composition of tire pyrolysis products. Disponível em: Energy & fuels, 2008

PNEUS DO ALCAIDE, Catalogo de Recauchutagem. Industria e Comercio de Pneus S.A. 2015.

POPULAR MECHANICS. The tech inside your tires: engineering the next generation of tires for optimum performance. (Advertisement). *Academic OneFile*. 2002.

PEREIRA, Lauero Charlet. TOCCHETTO, Marta Regina Lopes. Resíduos: “É preciso inverter a pirâmide – reduzir a geração”. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=residuos/index.php3.../residuos.htm>>.

RAMOS. Leonardo Sohn Nogueira. A logística Reversa de Pneus Inservíveis: O problema da Localização dos Pontos de Coleta. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis. 2005.

SALINI, Réus Bortolotto. Utilização de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2000.

SANDRONI, Mariana. PACHECO, Elen B.A V. O Destino Dos Pneus Inservíveis. Disponível em: < <http://www.niead.ufrj.br/artigoelen.htm>>. 2005.

SCHUBEL, P M. Fatigue characterization of tire rubber. Disponível em: Theoretical and applied fracture mechanics, 2004.

SHEN, Q. Detection of internal cracks in rubber composite structures using an impact acoustic modality. Disponível em: Nondestructive testing and evaluation, 2014.

THOMAS, Blessen. Mechanical properties and durability characteristics of concrete containing solid waste materials. Journal of cleaner production, 2013.