



**ANA LUIZA COSTA PEREIRA**

**TRANSFORMAÇÃO DOS RESÍDUOS  
RESULTANTES DA RECICLAGEM  
ENERGÉTICA DE PNEUS  
AUTOMOBILÍSTICOS EM GESSO**

**LAVRAS – MG  
2016**

**ANA LUIZA COSTA PEREIRA**

**TRANSFORMAÇÃO DOS RESÍDUOS RESULTANTES DA  
RECICLAGEM ENERGÉTICA DE PNEUS AUTOMOBILÍSTICOS EM  
GESSO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Instrumentação, para obtenção do título de Mestre.

Orientador  
Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo

**LAVRAS - MG  
2016**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Pereira, Ana Luiza Costa.

Transformação dos resíduos resultantes da reciclagem  
energética de pneus automobilísticos em gesso / Ana Luiza Costa  
Pereira. – Lavras : UFLA, 2016.

101 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de  
Lavras, 2016.

Orientador(a): Giovanni Francisco Rabelo.

Bibliografia.

1. Pneus. 2. Lavagem de gases. 3. Poluição. I. Universidade  
Federal de Lavras. II. Título.

**ANA LUIZA COSTA PEREIRA**

**TRANSFORMAÇÃO DOS RESÍDUOS RESULTANTES DA  
RECICLAGEM ENERGÉTICA DE PNEUS AUTOMOBILÍSTICOS EM  
GESSO**

**TRANSFORMATION OF WASTE RESULTING FROM RECYCLING  
ENERGY OF AUTOMOBILE TIRES IN PLASTER**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Instrumentação, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 09 de agosto de 2016.

Prof. Dr. Reginaldo Barbosa Fernandes	CEFET – Nepomuceno
Prof. Dr. Juliano Elvis de Oliveira	UFLA
Profa. Dra. Andréa Aparecida Ribeiro Corrêa	UFLA

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo  
Orientador

**LAVRAS-MG  
2016**

## AGRADECIMENTOS

A Deus e a Nossa Senhora, por terem me guiado e por todas as graças concedidas.

Aos meus pais, Marli e Roberto, por todo o apoio, ensinamento, incentivo nos momentos difíceis, e também por não medirem esforços para a minha formação.

À Maria Teresa e Tia Olivia, por tudo que me ensinaram e apoiaram. Ao tio Helder e tia Sandra, que sempre me acolheram e me ajudaram nesta caminhada acadêmica. Tia Leila, tio Marcelo e tia Laurita, tio Marcos, tia Denise, tio Cesar, tia Solange e tio Alexandre, pelo carinho. A todos eles agradeço pelo exemplo de vida e determinação.

Tia Vânia, e minha vó Iracema, por todas as orações e palavras de incentivo.

A minha prima Aline, pela amizade de tantos anos e a presença, mesmo estando longe.

Ao meu namorado, Fábio, pela compreensão e por tornar esta caminhada um pouco mais "leve".

Ao orientador, professor Dr. Giovanni, por ter acreditado no meu trabalho e ensinamento durante esses dois anos.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de cursar o mestrado e à Capes, pela concessão da bolsa, o que tornou possível a realização deste trabalho.

Ao David, por todo conhecimento, disponibilidade e ajuda durante todo este trabalho.

Ao Laboratório de análises solos água, pela ajuda para a realização das análises.

A Helem, secretária da Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela ajuda e paciência.

E a todos que contribuíram de alguma forma para que este degrau da minha vida fosse concluído. Obrigada!

## RESUMO

O sistema de produção industrial mundial gera muito resíduo, que, em grande parte, são lançados no meio ambiente. Porém, muitos desses resíduos poderiam ser reutilizados ou recuperados. Esse é o caso da indústria de pneus aplicada para veículos automotores. Muitos pneus ainda são descartados de forma inadequada ou, quando descartados em ecopontos, causam lotação rápida do local, devido ao tamanho, à baixa taxa de compressão e à demorada degradação. A incineração desse material ainda é uma alternativa; porém, se realizada ao ar livre, causa poluição do ar, solo e água, além de provocar problemas de saúde à população. O filtro de lavagem de gases permitem que essa queima seja realizada sem causar danos ao meio ambiente. A água residuária produzida pela lavagem dos gases apresenta um pH ácido, devido a presença de enxofre e outros compostos. Portanto, estudo avaliou a eficiência de um filtro de lavagem de gases, destinado à queima de pneus inservíveis e à neutralização da água residuária, pela adição de carbonato de cálcio. Constatou-se que o filtro reteve o enxofre nos valores de 3000 mg/l, obtendo êxito, pois não houve emissão de dióxido de enxofre. Quando a água residuária foi neutralizada com carbonato de cálcio, formou-se o sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ). A aspersão de água durante a queima reteve também metais pesados (Cr, Cd, Pb, As).

**Palavras-chaves:** Pneus inservíveis; Lavagem de negro de fumo; reciclagem energética.

## ABSTRACT

The world industrial production system generates a lot of waste, which is largely released into the environment. However, much of this waste could be reused or recovered. This is the case of the tire industry applied to motor vehicles. Many tires are also improperly disposed or, when disposed in ecopoints, they quickly fill places due to size, low compression ratio and slow degradation. The incineration of this material is still an alternative; however, if held outdoors, it causes pollution in the air, soil and water, in addition to causing health problems to the population. The gas cleaning filter allows this burning to be performed without causing damage to the environment. The wastewater produced by gas cleaning has an acidic pH due to the presence of sulfur and other compounds. Therefore, this study assessed the efficiency of a gas cleaning filter used in the combustion of scrap tires and wastewater neutralization, by the addition of calcium carbonate. It was found that the filter retained sulfur at values of 3000 mg/L, succeeding, since there was no sulfur dioxide emission. When the wastewater was neutralized with calcium carbonate, calcium sulfate ( $\text{CaSO}_4$ ) was formed. The water spray also retained heavy metals (Cr, Cd, Pb, As) during burning.

**Keywords:** Scrap tires. Carbon black cleaning. Energy recycling.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Estrutura química da borracha vulcanizada.....	24
Figura 2 -	Partes do pneu.....	27
Figura 3 -	Caracterização e classificação de resíduos sólidos.....	29
Figura 4 -	Região pólo Gesseira.....	58
Figura 5 -	Raspa de pneu.....	61
Figura 6 -	Interior dos tubos.....	62
Figura 7 -	Disposição dos aspersores.....	63
Gráfico 1-	Teor de acidez presente na água residuária.....	73
Gráfico 2 -	Teor de pH presente na água residuária.....	75
Gráfico 3 -	Teor de enxofre presente na água residuária.....	78
Gráfico 4 -	Teor de magnésio presente na água residuária.....	80
Gráfico 5-	Teor de cálcio presente na água neutralizada.....	81
Gráfico 6 -	Teor de arsênio presente na água neutralizada.....	84
Gráfico 7 -	Teor de cromo presente na água sem neutralizar.....	85
Gráfico 8 -	Teor de chumbo presente na sem neutralizar.....	86
Gráfico 9 -	Teor de cádmio presente na água residuária.....	87

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 -	Composição dos materiais utilizados nos pneus de automóveis e cargas por peso [adaptado de Adhikari, De e Maiti (2000); Brasil (2003)].....	25
Tabela 2 -	Limites máximos de emissão de gases poluentes.....	32
Tabela 3 -	Níveis de elementos na entrada do lavador de gás.....	70
Tabela 4 -	Resumo das análises de variância.....	72
Tabela 5 -	Valores médios e teste de interação realizado para avaliar quantidade de pneu na água residuária.....	74
Tabela 6 -	Valores médios e teste de interação realizado para avaliar quantidade de pneu na água residuária.....	77
Tabela 7 -	Magnésio, valores médios e teste de interação realizado para avaliar quantidade de pneu na água residuária.....	82
Tabela 8 -	Resumo das análises de variância dos metais pesados.....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

°C – grau Celsius  
a.C – Antes de Cristo  
Anip – Associação Nacional da Industria de Pneumáticos  
aq – Aquoso  
As – Arsênio  
Be – Berílio  
C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> – Acetileno  
C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> – Etileno  
C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> – Etano  
C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> – Benzeno  
CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O – Gipsita  
Cd – Cádmiio  
CH<sub>4</sub> – Metano  
CNPJ – Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica  
Co – Cobalto  
CO – Monóxido de Carbono  
CO<sub>2</sub> – Gás carbônico  
Conama – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
Copan -  
COV`S – Compostos orgânicos voláteis  
Cr – Cromo  
Cu – Cobre  
EPA – Proteção Ambiental Americana  
F – Furano  
FV – Fator de Variação  
g – Gasoso  
GL – Grau de liberdade;  
H<sub>2</sub>O – Água  
H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> – Ácido Sulfuroso  
H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – Ácido Sulfúrico  
HCL – Ácido clorídrico  
HF – Ácido fluorídrico  
HNO<sub>3</sub> – Ácido Nítrico  
Inmetro – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia  
kcal – Quilocalorias  
KJ – Quilo Jaule  
l – Líquido  
Mg – Magnésio  
mg/l – Miligrama por litro

mm – Milímetro  
Mn – Manganês  
N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Pentóxido de dinitrogênio  
NBR – Norma Brasileira  
NH<sub>4</sub> – Amônio  
Ni – Níquel  
NO<sub>2</sub> – Dióxido de nitrogênio  
NO<sub>x</sub> – Óxidos de nitrogênio  
O<sub>2</sub> – Oxigênio  
O<sub>3</sub> – Ozônio  
OECD – Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico  
OH<sup>-</sup> – Hidroxila  
PAH – Hidrocarbonetos Aromáticos, policíclicos  
Pb – Chumbo  
PCDD – Dioxinas  
PCI – Poder Calorífico Inferior  
pH – Potencial Hidrogeniônico  
PI – Partículas Inaláveis  
ppm – Partes por milhão  
PTS – Partículas Totais em Suspensão  
R – Radical  
Sb – Antimônio  
SBR – Borracha Estireno Butadieno  
Se – Selênio  
Sn – Estanho  
SO<sub>x</sub> – Óxidos de enxofre  
Te – Telúrio  
ton/h – Tonelada por hectare  
Uepam – Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira  
Zn – Zinco

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
2	OBJETIVO .....	21
2.1	Objetivo geral.....	21
2.2	Objetivos específicos .....	21
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
3.1	Pneu.....	23
3.2	Composição do pneu .....	25
3.3	Partes do pneu.....	26
3.4	Resíduos sólidos.....	28
3.5	Descarte.....	33
3.6	Reutilização do pneu.....	35
3.6.1	Pneu e asfalto.....	38
3.6.2	Forno de clínquer .....	39
3.6.3	Outras aplicações .....	42
3.7	Poluição atmosférica.....	43
3.7.1	Problemas com a emissão.....	44
3.7.2	Processo de queima do pneu .....	45
3.7.2.1	Pirólise.....	46
3.7.2.2	Combustão.....	47
3.7.2.3	Gaseificação.....	48
3.7.3	Problemas com a queima do pneu .....	50
3.8	Filtro.....	53
3.9	Qualidade da água .....	53
3.9.1	pH.....	55
3.9.2	Acidez.....	55
3.9.3	Metais pesados.....	56
3.10	Mineral.....	57
3.10.1	Tipos de gesso .....	58
3.10.2	Calcinação.....	59
3.10.3	Produção de gesso ambiental .....	59
3.10.3.1	Formação de gesso.....	60
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	61
4.1	Raspas de pneu.....	61
4.2	Filtro utilizado no trabalho .....	62
4.3	Queima.....	64
4.4	Análises de água .....	64
4.5	Processo de adição do carbonato de cálcio .....	65
5	ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	67
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	69

6.1	Partículas de borracha de pneu .....	69
6.2	Água sem tratamento.....	69
6.3	Água residuária.....	71
6.3.1	Acidez.....	73
6.3.2	pH.....	74
6.3.3	Enxofre.....	77
6.3.4	Magnésio e Cálcio .....	80
6.4	Metais pesados.....	82
6.4.1	Arsênio .....	83
6.4.2	Cromo .....	84
6.4.3	Chumbo.....	86
6.3.4	Cádmio.....	87
7	CONCLUSÃO .....	89
	REFERÊNCIAS.....	90



## 1 INTRODUÇÃO

A proteção e preservação do meio ambiente são fatores-chave que interferem na qualidade de vida, devendo ser uma preocupação de qualquer atividade econômica, visando à sua preservação para gerações atuais e futuras, pois se trata de um direito constitucional. O desafio que se coloca é o de garantir um equilíbrio entre os fatores de produção e o meio ambiente, mantendo um desenvolvimento econômico contínuo e sustentável a longo prazo. Cada vez mais, os governos são forçados a definir regulamentações mais rigorosas, obrigando as indústrias a engendrar maiores esforços econômicos. Assim, deverá ser realizado investimento no desenvolvimento de novas tecnologias alternativas, de forma a permitir que as indústrias cumpram com os novos padrões ambientais (CHIBANTE, 2012).

Entretanto, ainda hoje depara-se com situações de geração e acúmulo de grande volume de resíduos com potencial de contaminação do meio ambiente. Tal acúmulo ocorre, principalmente, pelo fato de essas questões terem sido tratadas por vários anos como algo inevitável e normal, que afetam o desenvolvimento econômico. Percebe-se a carência de regulação e fiscalização intensiva por parte dos órgãos de controle nas esferas: municipal, estadual e federal. Assim, o descuido com o meio ambiente tem resultado em poluição das águas, solo e ar, degradação da natureza, perda de biodiversidade, danos à saúde e qualidade de vida e geração de impactos sociais, culturais, podendo tornar-se uma situação irreversível e inclusive comprometer a médio e longo prazos o próprio desenvolvimento econômico.

Devido à constatação, conscientização e aumento dos resultados negativos das agressões ao meio ambiente, os países passaram a regulamentar e a adotar imposições mais rígidas aos diversos agentes envolvidos, sejam



consumidores, sejam empresas, poder público ou outras instituições (MOTTA, 2008).

Nas últimas duas décadas, tem-se presenciado um significativo crescimento dos movimentos ambientalistas e do interesse pela preservação ambiental. A população mundial tem mostrado que está cada vez mais consciente de que o modelo atual de desenvolvimento econômico, tanto em países desenvolvidos, como naqueles em vias de desenvolvimento, está intimamente associado à degradação do meio ambiente, com impactos diretos na qualidade de vida e na própria sobrevivência da espécie humana (FEAM, 2002).

O modelo de desenvolvimento atual, desigual, excludente e esgotante dos recursos naturais tem levado à produção de níveis alarmantes de poluição do solo, do ar e da água, à destruição da biodiversidade animal e vegetal e ao rápido esgotamento das reservas minerais e demais recursos não renováveis em praticamente todas as regiões do globo. Esses processos de degradação têm sua origem em um modelo complexo e predatório de exploração e uso dos recursos disponíveis, em que conceitos, como preservação, desenvolvimento sustentável, igualdade de acesso aos recursos naturais e manutenção da diversidade das espécies vegetais e animais, estão longe de ser realmente assumidos como princípios básicos norteadores das atividades humanas (FEAM, 2002).

A prevenção da poluição refere-se a qualquer prática que vise à redução e até mesmo à eliminação, seja em volume, seja em concentração e toxicidade das cargas poluentes na própria fonte geradora. Inclui modificações nos equipamentos, processos e procedimentos, reformulação ou replanejamento de produtos, substituição de matérias-primas e substâncias tóxicas que resultem na melhoria da qualidade ambiental (FIGUEIREDO et al, 2000),

A crescente atividade industrial mundial e a ausência de eficazes programas de gestão de resíduos fazem com que cada vez mais resíduos sejam gerados, sem que haja uma correta utilização ou deposição desses,

proporcionando um passivo ambiental que compromete a qualidade de vida das futuras gerações (RIBEIRO, 2009). E, com a indústria de pneus, o que ocorre não é diferente das demais, podendo ser considerada até mais grave, pois os pneus descartados ou são queimados ou se tornam abrigos úmidos para a proliferação de insetos.

Um pneu é considerado inservível quando não há mais condição de ser utilizado para circulação ou reforma e representa um passivo ambiental extremamente preocupante, por ser em grandes números e pelo grau de poluição que pode trazer ao meio ambiente. Todavia, o pneu descartado pode ser utilizado como uma importante fonte de energia, podendo ser utilizado como combustível em caldeiras, e também pode ser aproveitado na indústria cimentícia; porém, a fumaça tóxica liberada durante a queima é o que limita essa forma de utilização.

Os pneumáticos são compostos basicamente de borracha natural e sintética, derivados do petróleo, como o negro de fumo, aço e componentes químicos, como por exemplo o enxofre. Devido a essa composição, eles não são considerados biodegradáveis e demoram aproximadamente 600 anos para se decompor totalmente na natureza. Com isso, o descarte inadequado, hoje, pode gerar um grande passivo ambiental para as gerações futuras na sociedade brasileira (AZEVEDO, 2011).

No Brasil, de acordo com dados da Anip - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos, no ano de 2013, foram descartados cerca de 17 milhões de pneus por ano. Os números da produção desse tipo de resíduo são extremamente preocupantes, uma vez que existem poucos programas e iniciativas no sentido de reduzi-los ou reaproveita-los, gerando um dos graves problemas ambientais da atualidade. Os pneus possuem grande demanda pelo setor automobilístico. A produção nacional gira em torno de 68,7 milhões de unidades. Em, 2014, a Reciclanip, entidade ligada à ANIP, coletou e destinou de

forma ambientalmente correta mais de 445 mil toneladas de pneus inservíveis. Segundo dados mostrados, houve um incremento de 10,15%, se comparado ao mesmo período de 2013, quando o número foi de 404 mil toneladas.

Atualmente, os destinos comuns dos pneus inservíveis são os ecospontos, onde ficam empilhados, podendo servir de abrigo para mosquitos, roedores e outros animais peçonhentos, além de ficarem entulhados por ter baixa taxa de compactação, gerando um outro problema na qual seria a lotação desses ecospontos.

A prática de reformas (recapagem, recauchutagem e remoldagem) foi também uma maneira encontrada pela indústria pneumática, visando à diminuir a quantidade de pneu descartado e, também, de reciclagem do produto, além de ser uma alternativa em resposta à Resolução do Conama - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, n.º: 258, que obriga todas as indústrias pneumáticas a darem destino adequado a seus produtos, mesmo quando já comercializados.

Ainda assim, o problema do pneu não seria totalmente resolvido. A maneira de descarte definitivo desse passivo ambiental é a incineração; porém, as emissões provocadas por essa prática são enormes, alterando a qualidade do ar.

A incineração de resíduos sólidos (urbanos, perigosos, industriais, etc...) e a combustão de certos combustíveis fósseis (tais como carvão e biomassa) são normalmente prejudiciais para o meio ambiente, visto que produzem quantidades consideráveis de poluentes atmosféricos (gases ácidos, monóxido de carbono, compostos orgânicos voláteis, metais pesados, partículas,...), os quais são fontes locais e globais de poluição ambiental (BODÉAN E DENIARD, 2003; CHIANG et al., 2003; KOCH et al., 2005; VERDONE E FILIPPIS, 2006; CHIBATE, 2012).

As emissões de compostos tóxicos são um problema quando se trata de incineração de pneus automobilísticos, sendo uma maneira eficiente, pois o elimina completamente, evitando a lotação dos aterros; porém, é uma prática condenável pelos problemas de poluição.

A emissão de gases tóxicos na atmosfera, com a produção de efeitos que se manifestam até de material particulado tem crescido em quase todas as grandes aglomerações urbanas e industriais do mundo, afetando não só a qualidade local do ar, mas também produzindo efeitos que se manifestam em grandes distâncias e em longo prazo (GOMES, 2010).

Alterações da qualidade do ar são decorrentes do aumento da quantidade de substâncias tóxicas presentes nele, podendo trazer prejuízos à saúde humana e animal, à segurança e ao bem-estar da população e causar danos às plantas (GOMES, 2010).

Os filtros lavadores de gases seriam uma alternativa para reduzir a emissão de substâncias tóxicas, através da captura desses elementos por via úmida, e a água residuária poderia ser utilizada como fonte de nutrientes no setor agrícola ou na construção civil, após o tratamento adequado.

Visando à redução dos impactos ambientais resultados da prática de descarte dos pneus inservíveis, buscar-se-á mostrar, por meio de processos químicos, que é possível aproveitar resíduos de gases, como também os vapores da lavagem de gases e transformá-los em gesso. Neste trabalho propõe-se um estudo para o aproveitamento de lavadores de gases, ricos em enxofre, e obter, por meio de reações químicas, o sulfato de cálcio, elemento muito útil como corretivo de solo, necessário para a disponibilização de nutrientes para a produção agrícola e também com potencial de emprego na indústria da construção civil.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Objetivou-se com este trabalho avaliar a captura de elementos da fumaça, principalmente o enxofre, por meio da lavagem de gases de pneus inservíveis e, neutralizá-la com carbonato de cálcio.

### **2.2 Objetivos específicos**

Avaliar a água residuária da lavagem de gases resultantes da queima de pneu;

Avaliar a neutralização da água com o uso do carbonato de cálcio.



### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Pneu

A história dos pneus também começa com a roda. O registro mais antigo de uma roda veicular data de 3.500 a.C., aproximadamente. Ela apareceu em um desenho feito por um indivíduo da antiga Suméria, no Oriente Médio. Essa roda tinha cerca de 24 polegadas de diâmetro e era feita de pranchas arredondadas de madeira, presas por pedaços de madeira em forma de cruz (GOODYEAR DO BRASIL, 2003; LAGARINHOS, 2011).

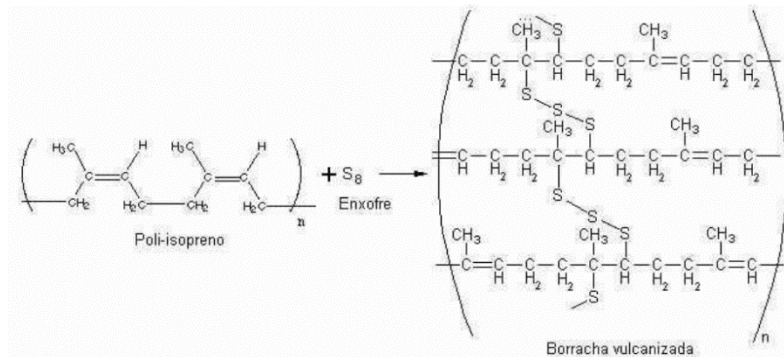
No começo do século XIX, aparecia em cena a máquina a vapor, que logo estava sendo usada para mover não apenas barcos, mas também veículos que percorriam estradas. A maioria das rodas tinha aros de aço e pneus de madeira. Os veículos eram pesados, extremamente difíceis de dirigir e as rodas não duravam muito (GOODYEAR DO BRASIL, 2003; LAGARINHOS, 2011). Em 1839, Charles Goodyear descobriu casualmente o processo de vulcanização da borracha; com isso, em 1845, aproveitando-se dessa descoberta, foi possível prover o emprego da borracha no setor industrial, melhorando as propriedades.

O processo de vulcanização é compreendido como o aquecimento prolongado da borracha natural, proveniente do látex das árvores *Hevea brasiliensis*, com adição de agentes aceleradores, ativadores, retardadores e principalmente do enxofre. A reação desse componente permite a formação de ligações cruzadas entre as macromoléculas, ilustrado na figura 1, que é responsável pelo desenvolvimento de uma estrutura tridimensional rígida, eliminando, assim, alguns inconvenientes da borracha relacionados à dureza, à aptidão em fracionar ao ser exposta a temperaturas baixas e a tornar-se pegajosa ao ser submetida a altas temperaturas. O resultado final da borracha é proveniente da formação da reação química, ligações cruzadas de cadeias



independentes dos elastômeros, ou seja, grandes cadeias moleculares que são ligadas entre si, por ligações cruzadas, resultantes de ações químicas que são desencadeadas pelo fornecimento de energia.

Figura 1- Estrutura química da borracha vulcanizada.



Fonte: Truckeemercantile (2011); Dourado (2011).

O pneu de borracha foi criado por R. W. Thomson, mas os primeiros pneus produzidos em grande escala foram para charretes, criados pelos irmãos André e Édouard Michelin que, posteriormente, desenvolveriam pneus para automóveis. Barbosa (2013), define o pneu como um item fundamental no carro, um item de segurança que afeta diretamente o desempenho do veículo, influenciando a dirigibilidade, o conforto e o consumo de combustível.

Atualmente, além da borracha sintética, os pneus possuem vários componentes, por ser um produto que tem como objetivo um longo tempo de vida útil, pois são “projetados e fabricados para durar em situações físicas, químicas e térmicas extremas, [...] apresentam uma estrutura complexa, com o objetivo de atribuir-lhes as características necessárias ao seu desempenho e segurança, confeccionados para serem indestrutíveis” (KAMIMURA, 2002).

### 3.2 Composição do pneu

A produção de pneus consiste em seis processos básicos: 1) mistura de polímeros, negro de fumo e outros componentes químicos utilizados na formulação do composto; 2) construção de tecidos de engenharia e arames de aço com coberturas de borracha; 3) extrusão de banda de rodagem, costados e outros componentes de borracha; 4) montagem dos componentes na máquina de construção de pneus; 5) vulcanização dos pneus sob temperatura e pressão; 6) finalização do processo com inspeção final, estocagem e o embarque dos pneus (LAGARINHOS, 2011) [Tabela 1].

Tabela 1 – Composição dos materiais utilizados nos pneus de automóveis e cargas por peso [adaptado de Adhikari, De e Maiti (2000); Brasil (2003)].

<b>Materiais</b>	<b>Pneu de Automóveis (%)</b>	<b>Pneu de Carga (%)</b>
<b>Borracha Natural</b>	14	27
<b>Borracha Sintética</b>	27	14
<b>Negro de Fumo</b>	28	28
<b>Aço</b>	14-15	14-15
<b>Tecido, aceleradores antiozônio, óleos, entre outros</b>	16-17	16-17
<b>Peso Total</b>	Peso médio do pneu novo: 8,5 kg. No Brasil, o pneu inservível pesa 5 kg, conforme a Instrução Normativa n.º: 008 do Ibama, de 15 de maio de 2002(*)	No Brasil, o pneu inservível pesa 40 kg, conforme a Instrução Normativa n.º: 008 do Ibama, de 15 de maio de 2002(*)

(\*) Na Instrução Normativa n.º: 008/02 consta a informação da equivalência em peso dos pneus de automóveis, ônibus, caminhões, motos e pneus fora de estrada. Em 2010, com a aprovação da Instrução Normativa n.º: 011/10, foi revogada a Instrução Normativa n.º: 008/02. Não existe um levantamento de campo do peso dos pneus inservíveis de automóveis, motos, ônibus e caminhões, realizado com as empresas de pré-tratamento e destinação desses produtos. Referência: Adhikari, De e Maiti (2000); Brasil (2003).

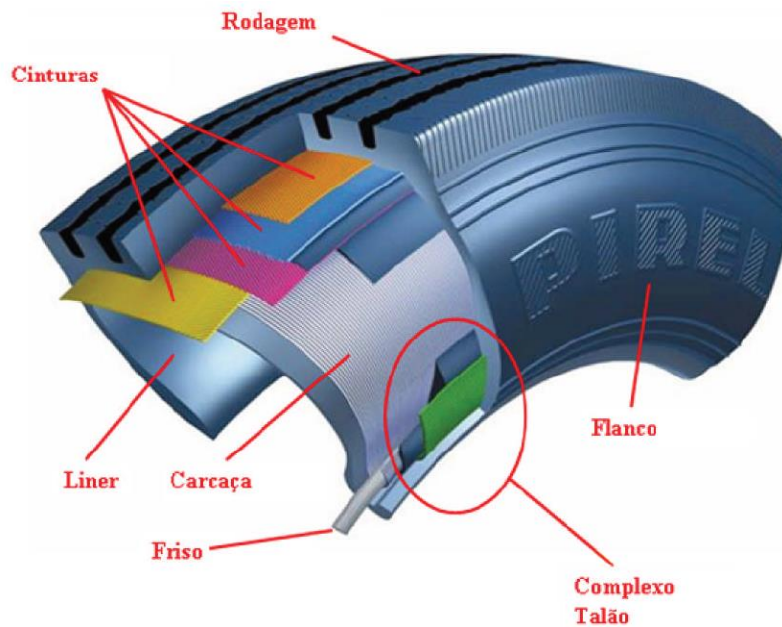
Os componentes presentes em maior quantidade nos pneus são a borracha estireno - butadieno (SBR), que apresenta resistência aos esforços e à abrasão, ao passo que os óleos são misturas de hidrocarbonetos aromáticos que servem para conferir maciez à borracha e aumentar sua trabalhabilidade durante sua confecção. O enxofre é usado para ligar as cadeias de polímero dentro da borracha e também endurecer, além de prevenir deformação excessiva em elevadas temperaturas. O acelerador é tipicamente um composto organo - sulfúrico que age como um catalisador para o processo de vulcanização. O óxido de zinco e o ácido esteárico também agem para controlar a vulcanização e realçar as propriedades físicas da borracha (GOULART, 1999; DOURADO 2011).

### **3.3 Partes do pneu**

Os pneus são os únicos contatos entre o veículo e o solo, suportando o peso, a transmissão, a aceleração e as paradas; absorvem, também, as irregularidades do asfalto, os ruídos, usam pouca energia e garantem a performance de todos esses itens, que devem ser mantidos por longos períodos (LAGARINHOS, 2011).

Com a evolução do pneu, cada parte (figura 2) desempenha uma determinada função que melhor se adapta às condições de atrito e esforços, dando maior conforto ao condutor e ao passageiro.

Figura 2 – Partes do pneu.



Fonte: Intranet Pirelli; Rodrigues (2010).

**Carcaça** – É uma estrutura resistente constituída de lonas, nylon ou aço que serve como suporte para esforços de tração originados pela pressão interna de inflação, pressão, peso ou choques gerados na condução do veículo.

**Complexo Talão** – Estrutura de aço que tem a finalidade de suportar esforços, como o de compressão e carga sobre o pneu, além de fixar os pneus na roda do veículo.

**Flanco** – Os pneus são revestidos por uma mistura de borracha com alto grau de flexibilidade e alta resistência à fadiga.

**Cinturas** – Compostas por fios de aço, as cintas permitem que o pneu tenha mais contato com o solo, deixando, assim, o carro numa condição estável, impedindo que objetos perfurem a carcaça do pneu.

Rodagem – Parte do pneu que fica em contato com o solo. Estruturado com uma camada de borracha com fissuras que dão origem ao desenho da escultura do pneu, tem como função proporcionar aderência em solo seco ou molhado; dar durabilidade e resistência ao desgaste e às agressões; participar na baixa resistência ao rolamento; contribuir para o conforto acústico; proporcionar maior controle do veículo e conforto ao dirigir.

Liner - Compostos de borracha com baixo índice de permeabilidade. Protegem a tela da penetração de ar e umidade e evitam a perda de pressão.

### **3.4 Resíduos sólidos**

O resíduo sólido é qualquer material, substância ou objeto descartado resultante de atividades humanas, animais ou decorrentes de fenômenos naturais, que se apresenta no estado sólido e semi - sólido, incluindo-se os particulados. Equiparam-se os resíduos sólidos aos lodos provenientes de sistema de tratamento de água e esgoto, e aos gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição (Acre, 2004). O resíduo agroindustrial é classificado por John (2000) como aqueles provenientes de atividades tipo agricultura, indústrias têxteis, de papel, automobilísticas e de beneficiamento de metais e, devido à sua geração concentrada, sua recuperação torna-se mais fácil.

Os resíduos também são classificados de acordo com sua periculosidade e solubilidade. De acordo com a Norma Brasileira (NBR 10.004), os Resíduos Classe I são perigosos, apresentando periculosidade por inflamabilidade, reatividade, corrosividade ou patogenicidade. Os Resíduos Classe II são não inertes, podendo ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Os Resíduos Classe III são inertes, não representando grandes problemas para o meio ambiente ou à saúde pública, como representado na figura abaixo.

Figura 3 - Caracterização e classificação de resíduos sólidos.



Fonte: Adaptado de ABNT (2004).

Ainda se pode classificá-los de acordo com o grau de degradabilidade, como facilmente degradáveis, no caso das matérias orgânicas; moderadamente degradáveis, que compõem os materiais celulósicos; dificilmente degradáveis, compostos de couro, borracha, madeira; não degradáveis incluindo-se os vidros, plásticos e metais (BIDONE; POVINELLI, 1999; CONTI, 2014).

As classificações variam de um país para outro, sendo alguns resíduos, mesmo considerados não perigosos em muitos países, ainda representam um grande risco ao meio ambiente quando não geridos de forma adequada. Como o caso dos pneus usados, que no Brasil são classificados como “inertes, não perigosos”, e na Suíça são classificados como “resíduos problemáticos” que podem causar perigo real, quando armazenados de forma inadequada (OECD, 2007; CONTI, 2014).

A destinação incorreta dos resíduos sólidos, líquidos e gasosos de diferentes fontes produtoras proporciona modificações nas características do solo, da água e do ar, podendo poluir ou contaminar o meio ambiente. A poluição ocorre quando os resíduos alteram o aspecto estético, a composição e a

forma do meio físico. A contaminação ocorre quando existir, por menor que seja, uma ameaça à saúde dos homens, plantas e animais.

A grande diversidade das atividades industriais gera, durante o processo produtivo, resíduos de diversas naturezas (sólidos, líquidos e gasosos), potencialmente poluidores e contaminantes do solo, água e ar. Apesar dessa preocupação, nem todas as indústrias geram resíduos com poder impactante nos três ambientes.

Os resíduos industriais diferem em suas composições, em relação ao tempo de duração do processo produtivo, ao volume produzido e ao potencial de toxicidade, sendo necessária a criação de procedimentos exclusivos para cada tipo de resíduo produzido. As caracterizações física, química e mineralógica dos resíduos são essenciais para a gestão dos impactos ambientais da disposição final. Os resultados dessa determinação podem auxiliar na tomada de decisão quanto aos procedimentos de disposição dos resíduos.

Um dos problemas evidentes no Brasil diz respeito ao manejo de resíduos sólidos urbanos, principalmente quando se trata dos impactos ambientais e da preservação dos recursos naturais. Os impactos causados no meio ambiente pela produção desenfreada de resíduos sólidos têm levado o governo e a sociedade a promover estudos direcionados às alternativas que visam a minimizar a degradação da natureza e aumentar o bem-estar da sociedade como um todo (OLIVEIRA et al., 2007).

Os resíduos pneumáticos apresentam, em sua maioria, uma estrutura formada por diversos materiais, como borracha, aço, nylon ou poliéster, e seu destino final incorreto transformou-se em sério risco ao meio ambiente. O governo tenta minimizar esse descarte através de leis, projetos e incentivo à reciclagem para tentar reduzir a quantidade e conscientizar também sobre o descarte adequado.

A primeira legislação sobre o descarte do pneu entrou em vigor no ano de 2008, pelo Conama, por meio do qual se prevê total responsabilidade dos fabricantes nacionais e internacionais sobre o destino final do pneu ao fim de seu uso. Segundo Nohara et al., 2006, no longo período sem legislação a respeito, segundo estimativas conservadoras da Associação Nacional da Indústria Pneumática (Anip), o país acumulou mais de 100 milhões de pneus descartados espalhados por aterros, terrenos baldios, rios e lagos e quintais de residências.

Existe uma imensa discrepância entre as estimativas de um órgão pertencente à própria indústria de pneumáticos, como a Anip, e os cálculos de outras instituições. Segundo a estimativa, a produção de 900 milhões de pneus, desde o início de sua fabricação no Brasil e a ausência de legislação, indicam a presença de, no mínimo, 400 milhões de pneus descartados, ou seja, mais de dois pneus inservíveis por habitante no Brasil (Anip, 2010).

O processo de incineração dos pneus inservíveis industriais tem sido uma alternativa para a redução do seu volume. Apesar de seu uso, esse processo tem sido muito questionado, pois, embora elimine possíveis riscos para a saúde pública, o manejo inadequado da sua operacionalização pode criar uma nova fonte de poluição e contaminação ambiental, causada pelos gases e pelo material particulado lançado na atmosfera.

Um resíduo, extremamente cogitado para queima em fornos de clínquer, é o pneu inservível, como forma de solucionar os problemas ambientais que os resíduos causam por si só (ocupação exagerada de espaço físico para sua deposição, não se degeneram facilmente e rapidamente, atraem larvas de insetos nocivos à saúde). Entretanto, sua queima libera para a atmosfera  $SO_x$  e  $CO_2$ , além de outros componentes químicos provenientes de sua composição (MONTEIRO et al., 2008).

Em síntese, a reutilização de materiais em coprocessamento tem desempenhado importante papel, tanto na preservação do ambiente, que é



poupado no descarte, quanto no aspecto econômico, pois uma parte do valor do produto é resgatada e reutilizada (HEESE et al., 2005; DOWLATSHAHI, 2000; SELLITO et al., 2013). Para a incineração nos fornos de clínquer, deve-se atentar para algumas exigências governamentais, bem como para as propriedades químicas e físicas do produto, e a principal é a quantidade de gases poluentes emitidas pelo processo, como mostrado na tabela 2.

O coprocessamento é uma contribuição efetiva da indústria de cimento para sustentabilidade. O processo usa pneus e outros resíduos como matéria-prima para fabricação de cimento. Temos também o coprocessamento de pneus na industrialização do xisto, que no processo industrial é extraído cerca de 50% na forma de óleo, 10% se transformam em gases e água e o restante (40%) em resíduos perigosos que devem ser tratados (SILVA et al., 2000).

Tabela 2 – Limites máximos de emissão de gases poluentes.

<b>Poluente</b>	<b>Limites máximos de emissão</b>
<b>HCL</b>	1,8kg/h ou 99% de redução
<b>HF</b>	5 mg/Nm <sup>3</sup> , corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
<b>CO – Gás Carbônico</b>	100 ppm, corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
<b>Material Particulado</b>	70 mg/Nm <sup>3</sup> farinha seca, corrigido a 11% de O <sub>2</sub> (base seca)
<b>Mercúrio</b>	0,05 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
<b>Chumbo</b>	0,35 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
<b>Cádmio</b>	0,10 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
<b>Tálio ( T)</b>	0,10 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
<b>(As+Be+Co+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Sb+Se+Sn+Te+Zn)</b>	1,4 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
<b>As+Be+Co+Ni+Se+Te)</b>	7,0 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)

Fonte: CARPIO et al., 2003.

Visto que a emissão de SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub> deverá ser fixada por órgãos ambientais competentes considerando as peculiaridades da região, tais como as

variações climáticas, o relevo, a intensidade de ocupação industrial, valores e qualidade do ar da região, os teores de emissão de gases poluentes podem ser restringidos pelo órgão ambiental local.

O pneu tem uma decomposição bastante lenta, devido à constituição, podendo levar mais de 600 anos para que o ciclo de decomposição seja completo. As soluções encontradas, como reforma, e transformá-lo em geração de energia são hoje uma das principais saídas para esse quadro.

### **3.5 Descarte**

Ao chegar ao fim da vida útil, os pneus devem ser destinados a pontos de coleta, por exemplo, porém o descarte inadequado de pneus ainda é um alarmante problema ambiental. Segundo Lagarinhos (2011), os problemas ambientais estão relacionados à instalação de grandes depósitos de pneus inservíveis, que ocupam áreas extensas e ficam sujeitos à queima acidental ou provocada, causando prejuízos à qualidade do ar, devido à liberação de substâncias tóxicas. Esses depósitos são igualmente danosos por se constituírem em criadouros de mosquitos, em especial o *Aedes aegypti*, que é o transmissor da dengue, chikungunya, zika e da febre amarela; e o *Anopholes*, transmissor da malária, pelas condições climáticas favoráveis, principalmente no período de janeiro a maio, quando ocorre a reprodução do mosquito.

Considerando o fato de que muitos pneus inservíveis são descartados de forma inadequada, constituindo um passivo ambiental que pode resultar em sérios riscos ao meio ambiente e à saúde pública, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), através da Resolução n.º: 258, 1999, resolveu que as indústrias e os importadores devem coletar e dar destino a pneus inservíveis no território nacional, para tentar minimizar os danos causados pelo descarte errôneo.

Cerca de 17 milhões de pneus são descartados no país, por ano, e, mesmo após a resolução do Conama entrar em vigor, a estimativa é que mais da metade seja descartada de forma errônea. A falta de uma política eficaz faz com que essa situação seja recente, principalmente em cidades de pequeno porte, onde a fiscalização é demorada, e nas cidades grandes onde há pouca fiscalização.

Os pneus inservíveis podem seguir três caminhos: os pneus convencionais são destinados para as empresas que realizam a laminação e transformação da borracha em artefatos diversos, como solados, cintas de sofá, tapetes para carros etc; os pneus radiais, na maior parte das vezes, são triturados e depois encaminhados para empresas produtoras de cimento, para queima nos fornos de clínquer, ou para o Processo Petrosix, que processa xisto betuminoso para obtenção de petróleo bruto; ou os pneus podem ser encaminhados para empresas regeneradoras de borracha, que os transformam em pó de borracha, embora sejam poucas as empresas que realizam esse processo a partir dos pneus, pois a maior parte delas se abastece dos resíduos gerados pelo processo de raspagem dos pneus usados, realizados pelas empresas reformadoras (RAMOS, 2008).

À medida que os pneus vão sendo descartados, a sociedade busca formas de utilizá-los no contexto de suas condições socioeconômicas, culturais e geográficas. Devido ao grande volume de material gerado e problemas de deposição, no Brasil e em diversos países, várias alternativas de destinação final de pneus têm sido adotadas (SCHMITT et al., 2010).

A reciclagem de pneus envolve um ciclo que compreende coleta, transporte, trituração e separação de seus componentes (borracha, aço e lona), transformando sucatas em matérias-primas que serão direcionadas ao mercado. Quanto menor a granulometria, maior será o custo do processo, o qual pode inviabilizar o desenvolvimento de alguns mercados potenciais. Nesse ponto, é

fundamental a parceria entre universidades e empresas, buscando-se analisar as oportunidades de mercado e o desenvolvimento de tecnologias adaptadas à realidade brasileira e que possibilitem a utilização da borracha reciclada em larga escala (BERTOLLO et. al., 2002, GARDIN et al., 2010).

### **3.6 Reutilização do pneu**

O processo de reciclagem de borracha é tão antigo quanto o próprio uso da borracha na indústria. Já em 1909, em Heipizig na Alemanha, havia a trituração e a separação da borracha de vários artefatos. A razão para o crescimento da indústria da reciclagem, em 1909, foi a falta de abastecimento da borracha e o alto custo de aquisição da borracha natural. Em 1960, a borracha reciclada era fornecida para as indústrias de artefatos de borracha. Óleos importados baratos, difusão do uso da borracha sintética e desenvolvimento de pneus radiais diminuíram o interesse em se triturar os pneus inservíveis. A tecnologia desenvolvida nessa época não era ideal para triturar os pneus radiais (LAGARINHOS et al, 2008).

Devido aos grandes problemas causados pelo descarte de pneus inservíveis, algumas alternativas foram desenvolvidas para que esse resíduo possa ser recuperado ou utilizado em outras finalidades. Para que isso fosse possível, tecnologias foram desenvolvidas para dar suporte a novas finalidades do pneu inservível, como a sua incorporação no asfalto.

Segundo Lagarinhos (2001), as tecnologias mais utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus, servíveis e inservíveis, são: recapagem, recauchutagem e remoldagem de pneus; coprocessamento em fornos de cimenteiras; coprocessamento de pneus com a rocha de xisto pirobetuminoso; pavimentação com asfalto-borracha; queima de pneus inservíveis em caldeiras; utilização na construção civil; regeneração de

borracha; desvulcanização; obras de contenção de encostas (geotecnia); indústria moveleira; equipamentos agrícolas; mineração; tapetes para reposição da indústria; solados de sapato; cintas de sofás; borrachas de rodos; pisos esportivos; equipamentos de “playground”; tapetes automotivos, borracha de vedação; confecção de tatames; criadouros de peixes e camarões; amortecedores para cancelas em fazendas; leitos de drenagem em aterros, entre outros.

A regulamentação do processo de reforma do pneu foi estabelecido no ano de 2010, pela Portaria do Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) n.º.: 444, que visa ao quesito de segurança para a linha automóvel e comercial (caminhão/ônibus). Porém, o pneu pode ser classificado como reformável ou não reformável, fator esse ligado à questão da recapagem, recauchutagem ou remoldagem de pneus, e apenas aqueles classificados como não reformáveis se tornam um produto para descarte final. Todas as modificações devem ser supervisionadas e serem adequadas às normas do Inmetro.

O Brasil ocupa o segundo lugar de reformas de pneus, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. Essa classificação é conferida por apresentar técnicas com padrões internacionais e baixos índices de problemas com relação à qualidade. As carcaças dos pneus são projetadas para suportar sobrevidas e proporcionar a mesma durabilidade de um pneu novo, além de ser uma alternativa para evitar o desperdício.

Existem três tipos de reformas de pneu liberadas pelo Inmetro, pela Portaria n.º.: 133, de setembro de 2001, sendo elas: a recapagem, a recauchutagem, a mais utilizada, e os pneus remoldados; todos esses processos permanecem apenas com a carcaça do pneu. Atualmente, as reformas de pneu estão sendo uma saída para os pneus que foram desgastados e precisaram ser trocados, reciclando e reduzindo o descarte.

Entende-se por pneu recauchutado aquele que tem não somente a banda de rodagem substituída, mas também os ombros da carcaça. São utilizadas camadas de “camelback” que são tiras de borracha colocadas dentro de um molde aquecido - processo a quente. Para os pneus serem recauchutados, eles devem estar isentos de cortes e de formações. É preciso que a banda de rodagem, e não apresente desgaste excessivo e conserve ainda, os sulcos responsáveis pela aderência do pneu ao solo. A quantidade máxima de recauchutagem a que um pneu pode ser submetido é de 5 (cinco) vezes; após esse número, o desempenho fica prejudicado.

Existem também os pneus remoldados. São pneus em que apenas sua parte externa é substituída por uma nova camada de borracha. Esse tipo de reforma tem como agravante uma durabilidade menor, por ter uma carcaça diferente e, muitas vezes, não compatível com a borracha a ser colocada, além de se eliminarem as origens do pneu, como procedência, data de fabricação, capacidade de carga, índice de velocidade, nome do fabricante.

O Inmetro exige que cada pneu reformado deve apresentar afixadas, de forma legível, estampas em alto relevo ou em etiqueta vulcanizada na lateral, com as seguintes informações: a expressão recauchutado, recapado ou remoldado; a designação da dimensão do pneu, capacidade de carga e limite de velocidade; a identificação do tipo de estrutura ou de construção da carcaça; a expressão “M+S” ou “M&S”, quando se tratar de pneu para lama ou neve; a marca do reformador; o CNPJ (*Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica*) do reformador, a expressão “sem câmara” para pneu projetado para uso sem câmara; a data de reforma – mediante uma sequência de quatro números, em que os dois primeiros indicam cronologicamente a semana da reforma e os dois últimos indicam o ano – e indicadores de desgaste da banda de rodagem, do índice de carga e de velocidade, em conformidade ao regulamento técnico (INMETRO, 2010).

Segundo Reinikka, a prática da reforma de pneus colabora em muito para a minimização dos impactos associados à fase de descarte final do pneu automotivo; além disso, “o pneu reformado permite minimizar custos de manutenção de frotas de veículos devido ao menor custo desse pneu, em comparação aos novos”, e também à economia de matérias-primas obtidas através do petróleo, e à energia elétrica utilizada na confecção de novos pneus (KAMIMURA, 2002; ANDRADE, 2007).

### **3.6.1 Pneu e asfalto**

Nos últimos anos, o crescimento da frota de automóveis tem ocorrido de forma descontrolada. Entre as diversas consequências negativas desse crescimento, destacam-se duas: o desgaste elevado da pavimentação asfáltica de baixa qualidade e a degradação do meio ambiente em que vivemos, através do descarte inadequado de pneus inservíveis (DRUMM, 2012).

Com o objetivo de melhorar a qualidade do asfalto convencional e solucionar o problema ambiental causado pelo acúmulo de pneus inservíveis, pesquisadores trabalham para encontrar novas tecnologias e materiais que modifiquem o desempenho do asfalto utilizado atualmente (DRUMM, 2012).

O asfalto-borracha, também chamado de asfalto ecológico, foi desenvolvido na década de 1960 nos Estados Unidos. Charles H. McDonald iniciou a pesquisa quando percebeu que os pneus triturados proporcionavam um material muito elástico que poderia ser utilizado no asfalto para corrigir problemas relacionados à durabilidade, resistência, flexibilidade, etc. Porém, a nova tecnologia só foi utilizada em larga escala no final do século XX, quando o seu custo de produção viabilizou sua utilização economicamente (DRUMM, 2012).

A relação entre a composição do asfalto e outros constituintes tem um efeito significativo nas propriedades viscoelásticas dos asfaltos e, conseqüentemente, no desempenho das pastas que pavimentam as estradas (MORALES et al., 2004; DOURADO, 2011). A alta resistência aos impactos da camada de borracha-betume a baixas temperaturas e sua adesão nas camadas inferiores faz com que não apresente rachaduras na superfície das estradas, antes de 10 anos. Do ponto de vista econômico, o aumento da longevidade do piso compensa o aumento do custo para a sua confecção (EPA, 1987; DOURADO, 2011).

O primeiro impacto positivo no uso de borracha em misturas asfálticas está no ambiente, pois a restauração de pavimento com esse tipo de asfalto pode usar até mil pneus por quilômetro, o que reduz o passivo ambiental causado pelo pneu. No entanto, outras vantagens ainda superam o ganho ambiental: aumento da vida útil do pavimento, maior retorno elástico, maior resistência ao envelhecimento precoce por oxidação do cimento asfáltico de petróleo e às intempéries e, ainda, maior resistência às deformações plásticas, evitando, assim, trilhas de rodas indesejáveis (DI GIULIO, 2007).

### **3.6.2 Forno de clínquer**

As indústrias de cimento passaram a utilizar o pneu inservível em seus fornos rotativos nos anos 90; porém somente anos depois, com o coprocessamento, foi realizado em grande escala (ROCHA et al., 2013).

O motivo pelo qual há grande interesse das fábricas de cimento nos pneus usados é porque eles atendem, às quatro condições principais para que um resíduo seja enquadrado na categoria de “combustível complementar”: disponibilidade a longo prazo nas quantidades necessárias, composição química



adequada, alto grau de homogeneidade e elevado poder calorífico (SANTI, 1997).

Os pneus podem ser completamente destruídos nos fornos de clínquer devido às características desses equipamentos, que combinam temperaturas extremamente elevadas com uma atmosfera oxidante e um tempo de residência de materiais relativamente longo. A combustão completa impede a formação de PCI's, (Poder Calorífico Inferior) de fuligem, ou de odores. Alguns cuidados devem ser tomados para a incineração dos pneus inservíveis; caso o pneu seja de tratores, deve-se fracionar para um melhor aproveitamento e queima do resíduo, além de realizar um pré-aquecimento antes de ir para os fornos (SANTI, 1997).

De maneira geral, existem duas formas de utilização de pneus inservíveis em fornos de cimenteiras: 1) pneus picados são colocados diretamente na zona de queima do forno, e 2) pneus inteiros são introduzidos na zona de calcinação. A queima de pneus inteiros pode aumentar as emissões de CO (monóxido de carbono), um gás poluente deletério à saúde humana. Para prevenir esse aumento, o forno deve ser equipado por um ventilador adicional para o suprimento de oxigênio (SILVESTRAVICIUTE e KARALIUNAITE, 2006).

Um ponto fraco desse método reside no fato de que o pneu incinerado necessita de um pré-acondicionamento, pois ele deve estar, no mínimo, cortado em pedaços, e isso faz aumentar o custo. Para tal, necessita-se de um investimento inicial nos equipamentos, além dos custos de manutenção. Essa desvantagem se refere principalmente ao pneu de carga, devido às dimensões e ao volume desse tipo de pneu (GOBBI, 2002).

São exemplos de indústrias que adotam esse método, as indústrias cimenteiras e as siderúrgicas. Contudo, nas indústrias cimenteiras, a incineração de pneus é muito mais forte, pois além de substituir o combustível, os pneus passam a se incorporar na carga do cimento, sendo tal processo chamado de

coprocessamento. Ainda há a possibilidade dos pneus inservíveis serem utilizados em centrais térmicas a carvão, para a produção de eletricidade (GOBBI, 2002).

O acompanhamento e o monitoramento do coprocessamento de pneus em diversas fábricas de cimento, no Brasil e no mundo, demonstram que os valores de emissão atmosférica, metais pesados e materiais particulados permanecem dentro dos limites das respectivas normatizações, não havendo influência na quantidade total de material particulado emitido, na quantidade total emitida de metais pesados, e na emissão de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>). Por último, existe pouca influência da emissão de CO, desde que o coprocessamento de pneus seja devidamente controlado (controle de oxigênio) e definição correta da taxa e do ponto ótimo de alimentação de pneus (HOLCIN, 1998).

Para o coprocessamento de pneus, devem-se estabelecer algumas condições operacionais:

- a temperatura dos gases na câmara de fumaça deve ser maior que 900°C;
- a temperatura dos gases na descarga do forno deve ser superior a 1000°C;
- o percentual de oxigênio no segundo estágio deve ser maior que 2%;
- a alimentação da farinha no forno deve ser maior que 180 ton/h;
- o filtro eletrostático deve estar operando normalmente.

Deve haver um automatismo que, ao detectar qualquer problema nas condições operacionais do forno, interrompa imediatamente a alimentação de pneus.

O poder calorífico obtido no pneu (cerca de 8790 kcal) é bastante elevado, o que torna interessante sua utilização como combustível. Comparando-se com as principais biomassas empregadas como combustíveis, esse poder calorífico é cerca de 2,27 vezes maior que da casca de arroz; 1,95 vezes o do bagaço de cana, 1,9 vez maior que o poder calorífico da maravalha de eucalipto; 1,8 vezes maior do que o obtido pela maravalha de pinus; 1,8 vezes maior que o poder calorífico dos coprodutos da macaúba e cerca de 1,5 vez maior que o poder calorífico do carvão vegetal e 1,9 vez maior que poder calorífico superior da madeira de *Eucalyptus grandis* (DOURADO, 2011).

### **3.6.3 Outras aplicações**

Os pneus podem ser transformados em óleo, gás e enxofre. Além disso, os arames que existem nos pneus radiais podem ser separados por meios magnéticos. Uma tonelada de pneus rende cerca de 530 kg de óleo, 40 kg de gás, 300 kg de negro de fumo e 100 kg de aço (AMBIENTE BRASIL, 2007; OLIVEIRA et al., 2007).

A pirólise é um processo de reciclagem utilizado em diversos países. O processo, em termos ambientais, é considerado limpo, já que são reaproveitados mais de 90% dos materiais componentes do pneu. Recupera, para o reuso de materiais que, de outra forma, estariam sendo extraídos da natureza, em fontes não renováveis e também por seu potencial de geração de energia elétrica. Merchant & Petrich (1993) demonstraram que os gases provenientes da pirólise podem ser utilizados como combustíveis, e o carvão, como matéria-prima na produção de carvões ativados (OLIVEIRA et al., 2007).

### 3.7 Poluição atmosférica

A poluição do ar teve crescimento com o início da Revolução Industrial, que usava o carvão mineral como geração de energia para as máquinas, resultando em toneladas de poluentes lançados ao ar atmosférico. Segundo Azuaga (2000), a poluição atmosférica pode ser definida como a presença de substâncias nocivas, na atmosfera, em quantidade suficiente para afetar sua composição ou equilíbrio, prejudicando o meio ambiente e as mais variadas formas de vida. Esse tipo de poluição causa sérios impactos não só à vida humana, como também à vida animal e vegetal, além da deterioração de bens culturais de lazer e alteração na composição química dos recursos naturais.

A qualidade do ar de uma região é influenciada diretamente pelos níveis de poluição atmosférica, os quais estão vinculados a um complexo sistema de fontes emissoras estacionárias (indústrias, queima de lixo, emissões naturais, entre outras) e móveis (veículos automotores, aviões, trens). A magnitude do lançamento dessas emissões, seu transporte e diluição na atmosfera determinam o estado atual da qualidade do ar atmosférico (CUNHA, 2002; DRUMM et al., 2014).

A Resolução do Conama n.º: 03/90 define como qualidade do ar: a) padrões primários de qualidade do ar: concentrações de poluentes que, quando ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população e; b) padrões secundários de qualidade do ar: concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Os padrões de qualidade do ar definidos para os poluentes atmosféricos são: partículas totais em suspensão (PTS), fumaça, partículas inaláveis (PI), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), ozônio (O<sub>3</sub>) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) (CANETTI, 2015).

Os poluentes atmosféricos são classificados em dois grupos: os poluentes primários e poluentes secundários. Os poluentes primários que são emitidos diretamente por uma fonte poluidora, como exemplo, os gases de escapamento de veículos e, os poluentes secundários, que são aqueles que sofrem reações químicas na atmosfera, ou seja, formados a partir da interação do meio poluente primário com os gases da atmosfera.

O material particulado são partículas muito finas de sólidos ou líquidos suspensos no ar, a composição e tamanho variam de acordo com as fontes de emissão. As partículas podem ser divididas em duas categorias: partículas grandes, com diâmetro entre 2,5 e 30  $\mu\text{m}$ , emitidas através de combustões descontroladas, dispersão mecânica do solo ou outros materiais da crosta terrestre (pólenes, esporos e materiais biológicos também se encontram nessa faixa de tamanho); e partículas pequenas, com diâmetro menor que 2,5  $\mu\text{m}$ , emitidas pela combustão de fontes móveis e estacionárias, como automóveis, incineradores e termoeletricas, que por serem de menor tamanho e mais ácidas, podem atingir as porções mais inferiores do trato respiratório (CANÇADO et al., 2006).

De acordo com MAGALHÃES, 2005 e LOPES, 2014, “os poluentes atmosféricos são principalmente gases, formados por substâncias gasosas e vapores, e material particulado, formado por substâncias sólidas e líquidas em suspensão, e têm sido alvo de inúmeras pesquisas científicas e de regulamentações legais para o seu controle, devido aos impactos que causam sobre a atmosfera, vegetação, saúde humana, animais e materiais”.

### **3.7.1 Problemas com a emissão**

Define-se como poluição do ar a presença na atmosfera exterior de um ou mais contaminantes, tais como poeiras, fumos, gases, névoas, odores ou

vapores em quantidades ou com características ou com uma duração, tais que possam ser nocivos para a vida humana, vegetal ou animal ou bens ou ainda que interfiram significativamente com a possibilidade de usufruir de boas condições de vida (GOMES, 2010).

Essa poluição tem gerado diversos problemas nos grandes centros urbanos. A saúde do ser humano, por exemplo, é a mais afetada com a poluição. Doenças respiratórias tais como a bronquite, rinite alérgica, alergias e asma, levam milhares de pessoas aos hospitais todos os anos. Outros problemas de saúde são: irritação na pele, lacrimação exagerada, infecção nos olhos, ardência na mucosa da garganta e processos inflamatórios no sistema circulatório (DERISIO, 2012).

O clima também é afetado pela poluição do ar. O fenômeno do efeito estufa está aumentando a temperatura em nosso planeta. Ele ocorre da seguinte forma: os gases poluentes formam uma camada de poluição na atmosfera, bloqueando a dissipação do calor. Dessa forma, o calor fica concentrado na atmosfera, provocando mudanças climáticas. Futuramente, pesquisadores afirmam que poderemos ter a elevação do nível de água dos oceanos, provocando o alagamento de ilhas e cidades litorâneas. Muitas espécies animais poderão ser extintas e tufões e maremotos poderão ocorrer com mais frequência.

### **3.7.2 Processo de queima do pneu**

Particularmente no caso da queima de pneu, é de suma importância que a emissão de hidrocarbonetos não queimados seja mínima. Entre as substâncias voláteis emitidas pelo aquecimento do material, há, por exemplo, furanos, antrácenos, dioxinas, bifenóis policlorinados e metais pesados, todas altamente carcinogênicas. Dados apresentados pelo relatório da EPA (1997) indicam que a queima a céu aberto de um quilograma de pneu libera 13,1 gramas de voláteis

não queimados, 31,7 gramas de semivoláteis e 14,9 gramas de sólidos orgânicos, totalizando 59,7 gramas (MARCHIORI, 2008).

O processo de queima ocorre em quatro estágios: no primeiro, um lote comprimido com peso equivalente a 30 até 35 pneus de veículo de passeio é inserido numa câmara não oxigenada a 700°C. Nesse estágio os hidrocarbonetos são volatilizados e os cabos de aço são soprados para fora da câmara. O restante do material segue para os demais estágios de combustão quando a concentração de oxigênio aumenta progressivamente até níveis superiores ao estequiométrico. Sólidos não queimados são recirculados de volta às câmaras de combustão. Somente após a combustão completa, os gases passam pelos tubos d'água da caldeira.

### **3.7.2.1 Pirólise**

A pirólise é o procedimento endotérmico, ou seja, que requer fonte de calor externa para que seja concluído. Conhecido também como destilação destrutiva, é um processo de quebra das ligações químicas na cadeia orgânica pelo calor, na ausência parcial ou total de um agente oxidante (oxigênio) e com temperaturas até os 400 °C.

No processo, podem ser produzidos gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ , etc.), líquidos (alcatrão, hidrocarbonetos pesados e água) e ceras, dependendo do material pirolisado e da temperatura a que são submetidos.

Nesse processo térmico, são gerados produtos com valores agregados, tais como óleo, gases e carvão, que podem ser utilizados como fonte de combustíveis ou em outros usos relacionados à indústria. Enquanto o processo de pirólise de carbonização (pirólise lenta) é dirigido especificamente para a produção de carvão, a pirólise rápida é considerada um processo avançado, no

qual, controlando-se os parâmetros de processo, podem ser obtidas quantidades consideráveis de bio-óleo (VIEIRA et al., 2011; LOPES, 2014).

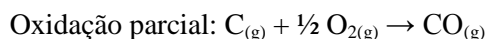
A pirólise rápida é um novo processo que utiliza pequenas partículas do material de alimentação que são rapidamente aquecidas até temperaturas em torno de 650°C.

### 3.7.2.2 Combustão

Combustão é uma reação química exotérmica entre uma substância (o combustível) e um gás (o comburente), geralmente ocorrendo a utilização do oxigênio, para que o calor possa ser liberado. Durante a reação de combustão, são formados diversos produtos resultantes da combinação dos átomos dos reagentes. No caso da queima em ar de hidrocarbonetos (metano, propano, gasolina, etanol, diesel, etc), são formados centenas de compostos, como, por exemplo, gás carbônico, monóxido de carbono, água, metano, nitratos, sulfetos, fuligem, etc, sendo que alguns desses compostos causam a chuva ácida, danos aos ciclos biogeoquímicos do planeta e agravam o efeito estufa.

Esse processo é dividido entre completa e incompleta. A combustão incompleta, quando não há presença de oxigênio suficiente para consumir todo o combustível. No caso dos compostos orgânicos, os produtos da combustão incompleta podem gerar monóxido de carbono (CO); conforme mostrado na reação I.

#### Reação I

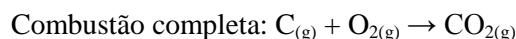


Em uma combustão completa, o produto irá queimar na presença de oxigênio. Quando um hidrocarboneto queima no oxigênio, a reação gerará



apenas dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Quando elementos, como o enxofre, são queimados, o resultado será os óxidos mais comuns, que é denominado de combustão completa.

### Reação II



Os processos de combustão são responsáveis pela produção de cerca de 85 % da energia do mundo, inclusive o Brasil, em transporte (carros, aviões, trens, navios, etc), usinas termoeletricas, processos industriais, aquecimento doméstico, geradores, cozimento de alimentos e outro. Em uma reação estequiométrica ideal de um hidrocarboneto em ar, são formados apenas CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O.

#### 3.7.2.3 Gaseificação

Segundo Belgioro (2003), a gaseificação é um processo de conversão térmica para produzir um gás combustível ou um gás de síntese para posterior utilização. No processo podem ser usados diferentes tipos de agentes de gaseificação, entre eles ar, O<sub>2</sub> e vapor de água. O uso de uma mistura de ar e vapor de água aumenta a concentração de hidrogênio (H<sub>2</sub>) no gás combustível. O gás combustível produzido pode ser usado para a produção de energia, em turbinas a gás, motores, ou ainda em caldeiras, enquanto o gás de síntese pode ser utilizado para a produção de diversos produtos, entre eles, amônia e metanol (GODINHO, 2006).

Alguns subprodutos são formados, no decorrer da gaseificação, que podem ser as cinzas, carvão ou o alcatrão. O alcatrão é um conjunto de compostos elevados no peso molecular. Estes tipos de subprodutos dependem do

projeto e condições operacionais do reator; o processo também pode gerar gases nocivos, como o metano e hidrocarbonetos.

Esta tecnologia é utilizada há mais de 50 (cinquenta) anos para a produção de combustíveis e produtos químicos. Os agentes de gaseificação (ar, oxigênio, vapor, vazão, velocidade do agente de gaseificação, vazão da biomassa, temperatura e pressão de operação) influenciam na qualidade do gás gerado. As características do produto queimado (umidade, composição elementar, poder calorífico e granulometria) também podem causar interferências.

A gaseificação é dividida em duas partes: direta e indireta. A gaseificação direta ou autotérmica é uma forma de fornecimento de calor ao processo com o vapor como agente de gaseificação, que é realizada pela adição de pouca quantidade de oxigênio. Com o fornecimento de oxigênio as reações exotérmicas são geradas juntamente com as reações endotérmicas próprias da gaseificação com vapor, o principal problema é o oxigênio.

A gaseificação indireta ou alotérmica é aquela cujo o processo ocorre com a ajuda de uma fonte de energia externa. Vapor d'água é o agente de gaseificação mais comumente utilizado na gaseificação indireta, por ser facilmente produzido e aumenta a quantidade de hidrogênio no gás combustível produzido através da reforma a vapor.

A transformação de um sólido para o estado gasoso envolve inúmeras sequências de reações paralelas, em que a maioria das reações são endotérmicas e, por esse motivo, devem ser mantidas pela combustão parcial do gás gerado ou por fornecimento de calor externo.

Os gaseificadores são classificados conforme o poder calorífico do gás produzido, o tipo de agente gaseificador (ar; vapor; oxigênio ou hidrogênio, na hidrogaseificação), a direção do movimento do material a ser gaseificado e do agente de gaseificação, a pressão de operação, e principalmente o tipo de

material que será queimado. O processo de gaseificação pode ser realizado em diferentes tipos de reatores.

### **3.7.3 Problemas com a queima do pneu**

O controle das emissões de CO<sub>2</sub>, um dos principais gases causadores do efeito estufa, representa um dos maiores desafios do setor na área de meio ambiente. A indústria do cimento contribui com aproximadamente 5% das emissões antrópicas de gás carbônico do mundo. Com isso, o Brasil atingiu atualmente um dos menores níveis de emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento, quando comparado aos principais países produtores de cimento (SNIC, 2011).

Na queima indiscriminada dos pneus a céu aberto, há a ocorrência da liberação de substâncias tóxicas nocivas, por meio de emissões gasosas de CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PAH (hidrocarbonetos Aromáticos, policíclicos), metais pesados como Pb (chumbo), Cd (cádmio), PCDD/F (Dioxinas e Furanos).

Dioxinas têm sido descritas como os compostos químicos mais tóxicos já produzidos pelo homem, estando entre as substâncias mais perigosas conhecidas pela ciência. Elas têm propriedades que dificultam seu controle e medição. Mesmo em quantidades muito pequenas, as dioxinas se caracterizam pela sua grande afinidade pelos tecidos lipídicos e pela sua persistência, ou seja, não degradação, tanto no meio ambiente como nos tecidos biológicos (VELOSO et al, 2013).

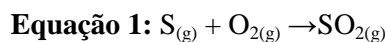
As reações químicas que ocorrem entre os compostos liberados e as moléculas de água presentes na atmosfera são os que preocupam os estudiosos. A acidificação das chuvas é um desses problemas. A chuva ácida é definida como a alteração no pH acima do normal, processo que ocorre com quantidades muito grande de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e óxidos de nitrogênio (NO, NO<sub>2</sub>,

N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) que, quando em contato com o hidrogênio em forma de vapor, formam ácidos como o ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) ou o ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

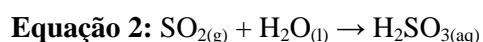
De todos os compostos de enxofre, o dióxido de enxofre é o poluente majoritários. É um gás incolor e não inflamável com odor irritante. O limiar de detecção é de 0,5 ppm. Nos processos de combustão que ocorrem em centrais térmicas, o dióxido de enxofre forma-se na razão de 4 a 8 partes por cada parte de trióxido de enxofre. Uma vez na atmosfera, dão-se várias reações que promovem a remoção do dióxido de enxofre, como seja a reação de oxidação parcial que se dá na presença de óxidos metálicos (GOMES,2010).

Em relação à chuva ácida proporcionada por reações da água com gases SO<sub>x</sub>, após a rápida reação do enxofre elementar com o oxigênio, durante a combustão, há a formação preferencial do SO<sub>2</sub>, segundo a reação apresentada na equação 1, e, aí, diferentes rotas podem ocorrer para a formação da chuva ácida. O dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) pode formar ácido sulfúrico, na sua reação com óxido nítrico e água, conforme apresentado na equação 2; no entanto, as principais rotas são reações que envolvem a participação do radical OH<sup>-</sup> ou a oxidação do SO<sub>2</sub>, conforme representado nas equações 3.

A água das chuvas torna-se mais ácida ainda com a presença do dióxido de enxofre, o qual é formado pela reação (oxidação) que ocorre com a liberação do enxofre e a molécula de oxigênio presente na atmosfera. Uma vez emitido, o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) tem a tendência a reagir com vários oxidantes presentes na atmosfera e formar sulfato particulado, na forma de gotas de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ou na forma de partículas neutralizadas, tais como sulfato de amônio [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>].



O gás dióxido de enxofre solúvel em água, quando é lançado na atmosfera, reage com as gotículas de água, formando o ácido sulfuroso:



Outras substâncias (R) presentes na atmosfera podem ser incorporadas às gotículas de água das nuvens e oxidar ou servir como catalisador para a reação de oxidação do ácido sulfuroso a ácido sulfúrico:



Quando atingem a superfície terrestre e o ambiente não consegue mais neutralizar a acidez da chuva, inicia-se um processo de degradação ambiental que vai desde a acidificação das águas e do solo, com sérios problemas de redução da biodiversidade e de alterações físico-químicas nesses ambientes, até a ocorrência de declínio de florestas e prejuízos à agricultura e à pesca. Além disso, a chuva ácida acelera a corrosão e o desgaste de materiais e, no homem, o organismo pode ter suas funções comprometidas pelo acúmulo de metais pesados dissolvidos trazidos pelas águas de chuva acidificadas.

Os compostos de enxofre, que são outros dos poluentes mais comuns da atmosfera, são produzidos pela queima de combustíveis fósseis, em particular, os queimados em centrais térmicas. Os principais compostos que são incluídos nessa categoria são, como formas oxidadas: o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), o trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ), ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), o ácido sulfuroso ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) e, como forma reduzida: o ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (GOMES, 2010).

Os sais de enxofre, tais como o sulfato de cobre, sulfato de cálcio e o sulfato de magnésio, são compostos que podem resultar da queima de combustíveis fósseis em diversas formas e em diversos processos industriais.

Contudo, alguns desses sais de enxofre são produtos finais resultantes da utilização das técnicas de controle das emissões de dióxidos de enxofre (GOMES, 2010).

### **3.8 Filtro**

O aquecimento global e a preocupação ambiental nunca estiveram tão cogitados como no momento. Não é mais possível se pensar em desenvolvimento sem citar a sustentabilidade dos recursos naturais. Pensando no ar como recurso natural a ser cuidado, observa-se a utilização de lavadores de gases na coleta de micropartículas que, se emitidas no ar, podem causar sérios danos à saúde (DIAS, 2007).

O lavador de gás é um dispositivo empregado no controle da poluição atmosférica, na recuperação de materiais, no resfriamento e na adição de líquido ou vapor nas correntes gasosas. As partículas sólidas presentes em um fluxo de gás são coletadas através do contato direto com o líquido atomizado, geralmente a água (GAMA, 2008).

Esses equipamentos são caracterizados pela alta versatilidade e eficiência e baixo consumo de energia, além de poder ser acoplado a qualquer capela de exaustão de gases e possuem um reservatório para o armazenamento da água, com a função de neutralizar os gases, via úmida.

### **3.9 Qualidade da água**

A poluição da água se define como a alteração de sua qualidade natural pela ação do homem, que faz com que seja parcial ou totalmente imprópria para o uso a que se destina. Entende-se por qualidade natural da água o conjunto de características físicas, químicas e bacteriológicas que ela apresenta em seu

estado natural nos rios, lagos, mananciais, no subsolo ou no mar (CONEZA, 1997). De um modo geral, a poluição das águas pode ocorrer principalmente por esgotos sanitários, águas residuárias industriais, lixiviação e percolação de fertilizantes e pesticidas, precipitação de efluentes atmosféricos e inadequada disposição dos resíduos sólidos (STUDART e CAMPOS, 2001). Os conceitos de qualidade da água e poluição estão comumente interligados. Porém, a qualidade da água reflete sua composição quando afetada por causas naturais e por atividades antropogênicas. A poluição, entretanto, decorre de uma mudança na qualidade física, química, radiológica ou biológica do ar, água ou solo, causada pelo homem ou por outras atividades antropogênicas que podem ser prejudiciais ao uso presente, futuro e potencial do recurso (BRANCO, 1991).

Pode-se considerar a poluição ambiental como a degradação do ambiente, resultante de atividades que, direta ou indiretamente, prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar das populações; criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; afetem desfavoravelmente a biota; afetem as condições sanitárias do meio ambiente; e lancem matéria ou energia em desacordo com os padrões de qualidade ambiental estabelecidos (DERISIO, 2012).

A qualidade da água é representada por características intrínsecas, geralmente mensuráveis, de natureza física, química e biológica que, se mantidas dentro de certos limites, viabilizam determinado uso. Esses limites constituem os critérios (recomendações) ou padrões (regras legais) da qualidade da água (DERISIO, 2012).

A qualidade requerida está bem definida nas concentrações máximas permitidas para determinadas substâncias, conforme especificado nas Resoluções Conama n.º: 357/05, n.º: 396/08 e n.º: 430/2011, que dispõem sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e superficiais, além estabelecer as condições e padrões para o

lançamento de efluentes. Os principais indicadores da qualidade da água são separados sob os aspectos físicos, químicos e biológicos.

Alguns parâmetros são necessários para certificar-se de que a água é de boa procedência. Abaixo foram descritos alguns que foram utilizados no trabalho.

### **3.9.1 pH**

O potencial hidrogeniônico (pH) consiste na concentração dos íons  $H^+$  nas águas e representa a intensidade das condições ácidas ou alcalinas do ambiente aquático. No valor do pH, aliado à dissociação da molécula de água, incorpora-se o hidrogênio resultante da dissociação de ácidos orgânicos naturais ou inorgânicos presentes em efluentes industriais (PIVELI; KATO, 2006).

O pH talvez se constitua no parâmetro de maior frequência de monitoramento na rotina operacional das estações de tratamento de água pela interferência em diversos processos e operações unitárias inerentes à potabilização e à aplicação dos coagulantes ao processo de desinfecção química.

O pH influi no grau de solubilidade de diversas substâncias, e como consequência, na intensidade da cor, na distribuição das formas livre e ionizada de diversos compostos químicos, definindo também o potencial de toxicidade de vários elementos.

### **3.9.2 Acidez**

Em contraposição, a acidez é a característica química indicada para neutralizar bases e também evitar alterações bruscas no pH, graças, especialmente, à concentração de gases dissolvidos, como  $CO_2$  e  $H_2S$  ou ácidos húmicos e fúlvicos. Pode ter origem natural – pela absorção atmosférica e



decomposição de matéria orgânica ou antrópica, pelo lançamento de despejos industriais e lixiviação do solo de áreas de mineração. Similarmente em relação à alcalinidade, a distribuição das formas de acidez é efetuada em função do pH.

### **3.9.3 Metais pesados**

Os metais pesados são os agentes tóxicos mais conhecidos pelo homem. Em 2000 a.C., grandes quantidades de chumbo eram obtidas de minérios como subprodutos da fusão da prata. Isso terá sido, provavelmente, o início da utilização desse metal pelo homem. Se, por um lado, foram as primeiras toxinas a serem identificadas, elas não incluíam todos os metais, pois, por exemplo, os efeitos tóxicos do cádmio só muito recentemente é que foram identificados e ainda hoje não está perfeitamente apurada a sua toxicocinética. Dos metais conhecidos, nem todos provocam toxicidade, pois, do total dos 80 metais conhecidos, apenas aproximadamente 30 são tóxicos para o homem (ROCHA, 2009).

Os efeitos tóxicos dos metais eram considerados como eventos de curto prazo, agudos e evidentes, tal como a diarreia sanguinolenta, como, por exemplo, quando da ingestão de mercúrio. Atualmente, ocorrências a médio e a longo prazos são observadas e as relações causa-efeito são pouco evidentes. Geralmente, esses efeitos são difíceis de ser distinguidos e perdem em especificidade, pois podem ser provocados por outras substâncias tóxicas ou por interações entre esses agentes químicos (ROCHA, 2009).

Embora alguns metais possam desempenhar importantes funções aos integrantes da biota aquática – por exemplo, magnésio e cobre, respectivamente como integrantes da clorofila e dos citocromos - a quase totalidade apresenta algum grau de toxicidade aos organismos. À genérica denominação de metais pesados insere-se amplo rol de elementos, como cromo, cobre, mercúrio,

magnésio, chumbo, cádmio, zinco, cobalto, molibdênio, níquel e prata, passíveis de causar algum dano à saúde humana.

Diversos metais pesados são encontrados na forma dissolvida nas águas naturais, resultado do lançamento de efluentes industriais (líquido e/ou gasoso), de fertilizantes, da lixiviação de áreas de garimpo e da mineração.

### **3.10 Mineral**

Os termos “gipsita” e “gesso” são usados frequentemente como sinônimos. A denominação gipsita, no entanto, parece mais adequada ao mineral em estado natural, enquanto gesso indicaria o produto calcinado. O mais antigo emprego da gipsita foi em obras artísticas; o alabastro (uma variedade de gipsita) era utilizado pelas civilizações antigas em esculturas e ornamentações. Os egípcios usaram gipsita há cerca de 3000 anos a.C., e os romanos a utilizaram, em pequenas quantidades, no acabamento de construções. A gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) é a matéria-prima para a produção de gesso. Ela é uma rocha de origem sedimentar, constituída por cloretos e sulfatos de cálcio, magnésio e potássio, formada por evaporação de águas salobras e charcos, com lâminas de água de pouca espessura, em que não existe descarga para o mar e sob clima que se pode considerar árido. Comercialmente, o minério de gipsita é considerado puro quando se compõe basicamente de sulfato de cálcio dihidratado, contendo 79,0% de sulfato de cálcio e 21% de água de cristalização. O sulfato de cálcio semi-hidratado (produto da calcinação da gipsita), comercialmente denominado gesso, tem a propriedade de endurecer quando misturado com água, resultando em rigidez e dureza. Assim, o gesso tem sido obtido a partir da gipsita por aquecimento (desidratação térmica), de forma que se perca cerca de dois terços de água de sua constituição (LEITÃO, 2005).

No Brasil, a maior região extrativista de gipsita situa-se em Pernambuco, na região do Araripe (Figura 4), onde o mineral é encontrado mais puro e com melhores condições de lavra. Correspondem a 18% das reservas brasileiras, mas seu teor de aproveitamento é muito alto, devido às condições favoráveis de mineração, à pureza do minério, entre 88% e 98% (consideradas as melhores do mundo) e à localização estratégica, na fronteira dos estados de Pernambuco, Ceará e Piauí. São extraídas 2,8 milhões de toneladas/ano e mais de 600 empresas estão envolvidas na atividade gesseira.

Figura 4 – Região pólo Gesseira.



Fonte: Peres (2014).

### 3.10.1 Tipos de gesso

Na produção do gesso, podem-se obter dois tipos de materiais provenientes da gipsita: o gesso alfa e o gesso beta. O gesso alfa é um produto mais nobre, destinado ao uso odontológico e hospitalar, podendo ser confeccionado *in loco* e moldado conforme o consumidor necessite. Esse gesso apresenta valor elevado, exigindo maiores cuidados, devendo ser livre de quaisquer impurezas. Para obtenção desse produto, utilizam-se temperaturas

mais elevadas, promovendo maiores gastos. O gesso beta é mais utilizado pela construção civil, sendo um material de menor custo.

### **3.10.2 Calcinação**

Nos Estados Unidos, a calcinação da gipsita para emprego na construção civil começou em 1835, mas essa aplicação só se desenvolveu por volta de 1885, com a descoberta de um método comercial para retardar o tempo de pega do gesso (LEITÃO, 2005).

O processo de calcinação da gipsita, etapa de produção do gesso em que o minério é submetido a altas temperaturas, necessita de muita energia, na maioria das vezes proveniente de madeira de espécies nativas retiradas da Caatinga. Nessa vegetação, típica do nordeste brasileiro, predominam as formações vegetais xerófilas, que não apresentam produtividade suficiente nos planos sustentados de manejo florestal, para atender o atual consumo só por parte da indústria do gesso (DA SILVA, 2013).

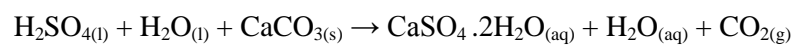
A gipsita, quando calcinada, é transformada em gesso, o sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ), tendo largo emprego na construção civil, servindo como pré-moldados para paredes, divisórias e revestimentos para tetos (blocos, bloquetes, placas e sancas). Na construção civil, tem sido observada uma utilização crescente do gesso como acabamento fino de paredes, muito mais barato e com qualidade superior que outros tipos de acabamento (DE ARAUJO, 2013).

### **3.10.3 Produção de gesso ambiental**

O gesso pode também ser fabricado. A junção de dois elementos, ácido sulfúrico e carbonato de cálcio, pode formar a gipsita, que dá origem ao gesso.

### 3.10.3.1 Formação de gesso

Os gessos podem ser formados também de forma artificial. A neutralização do ácido sulfúrico, pelo carbonato de cálcio, é uma forma de produção desse material.



## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O filtro de lavagem de gases foi construído na Uepan – Unidade Experimental de Painéis de Madeira, e as análises realizadas no Departamento de Engenharia e Departamento de Solos, todos localizados na Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais. O experimento teve início em janeiro de 2015, finalizando em maio de 2016.

### 4.1 Raspas de pneu

As raspas de pneu automobilístico (Figura 5), provenientes do processo de raspagem na reforma dos pneus, foram doadas por uma unidade reformadora da cidade de Lavras-MG. As partículas resultantes apresentaram formatos e tamanhos diversos; por isso, foram encaminhadas para o Uepam (Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira) da Universidade Federal de Lavras, para posterior preparo, passando através da peneira com malha 50 mesh.

Figura 5- Raspa de pneu.

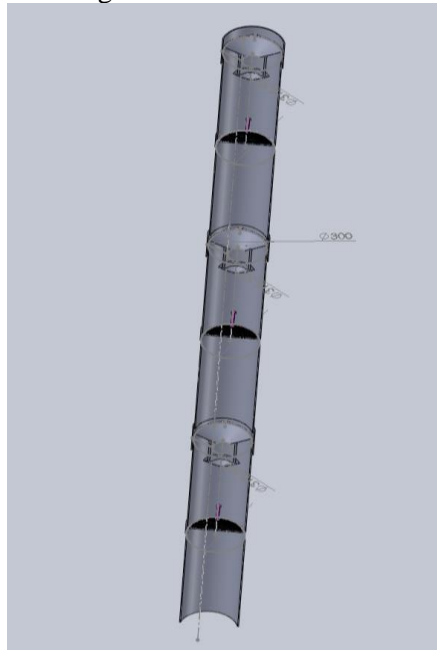


Fonte: Autora.

#### 4.2 Filtro utilizado no trabalho

O filtro proposto neste trabalho tem a função de reter essas emissões que são nocivas causadas pela queima de pneu inservível. O filtro foi confeccionado por tubos de PVC por onde passa a água (figuras 6) e depositada em recipiente armazenador próprio. Os Lavadores de Gases utilizam a água como meio principal para remover do fluxo de gases os poluentes provenientes dos mais diversos tipos de processos industriais e/ou comerciais. Pode-se afirmar que os lavadores são indicados para processar gases provenientes de processos químicos ou físico-químicos em diferentes faixas granulométricas.

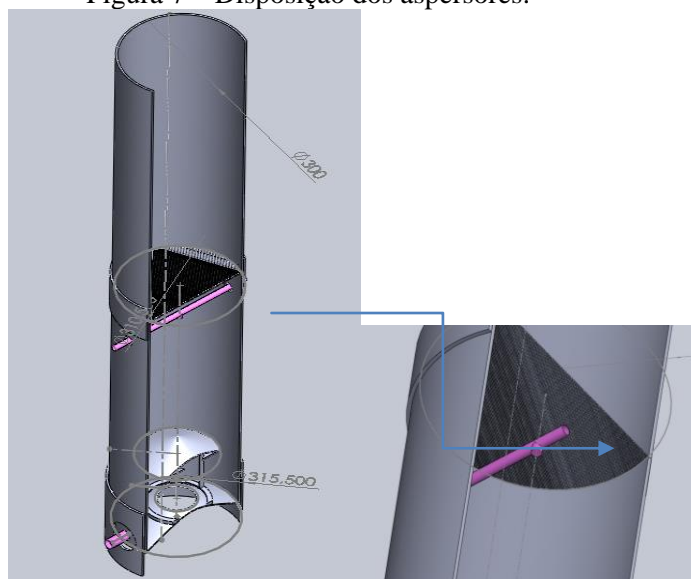
Figura 6 – Interior dos tubos.



Fonte: Dourado (2011).

No interior do filtro há um tubo de PVC com 2 mm de diâmetro, por onde passa a água, e três microaspersores posicionados a uma distância de 50 cm cada um, e colocados de forma alternada, como ilustrado na figura 7.

Figura 7 – Disposição dos aspersores.



Fonte: Dourado (2011).

Trata-se de um filtro que funciona como uma peneira, cuja função é reter as impurezas do processo de queima. Os filtros de gases retêm todos os compostos presentes na fumaça, proporcionando, assim, a não emissão de gases tóxicos.

As vantagens de incinerar o pneu em lavador de gases é poder realizar esse processo sem que haja quaisquer danos ao meio ambiente, levando em consideração que os gases nocivos foram retidos pela água, a fumaça liberada foi limpa, ou seja, livre de contaminantes, as cinzas e a água provenientes da água poderão ser descartadas de forma correta, sem que haja danos ao meio ambiente, além de se poder aproveitar o pneu como fonte de energia, visto que o



poder calorífico do pneu pode chegar até 1888 KJ, o que o torna uma excelente fonte. Também não há restrição de utilização quanto a temperatura ou umidade do material.

### **4.3 Queima**

As raspas de pneu foram queimadas em um reator. A fumaça liberada pela queima foi sugada pelo exaustor, para o tubo maior, contendo os aspersores de água. O ar com pó recebeu água pulverizada bombeada do tanque do lavador. As partículas entraram em choque com as gotículas de água, resultando em uma água residuária com compostos químicos, armazenada em um tambor para que as demais análises pudessem ser realizadas.

As raspas foram separadas por quantidades (500g, 1000g, 1500g, 2000g, 2500g, 3000g) e lotes diferentes. A queima foi realizada em um filtro de lavagem de gases na qual as substâncias nocivas ao meio ambiente foram retidas por meio da aspersão de água. A quantidade queimada, por sua vez, foi fracionada para que todo o material fosse queimado de forma uniforme. As amostragens de água retiradas para a análise foram realizadas depois de todo o processo de cada tratamento.

### **4.4 Análises de água**

A água residuária foi coletada e armazenada em garrafas pet`s, devidamente higienizadas, e conduzidas ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, para as análises.

As análises de acidez e pH foram realizadas no Laboratório de Água no Departamento de Engenharia. A acidez foi verificada pelo método de neutralização com soda cáustica, conforme a norma da Copan 001/2008,

seguindo os métodos de análises da “Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater”. O pH foi analisado pelo equipamento pHmetro Tec 3MP, marca Tecnal, fabricado no Brasil.

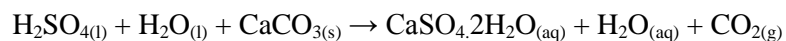
As análises de cobre, chumbo, arsênio, cádmio, foram encaminhadas ao Laboratório de Solo e Água, da também Universidade Federal de Lavras, realizadas através do equipamento Espectrofotômetro de absorção atômica simultânea em forno de grafite, Aanalyst 800. Marca Perkin Elner Precisely.

As demais análises de enxofre, cálcio e magnésio foram determinados pelo aparelho de ICP OES, Espectrômetro de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado, Marca, Spectro, modelo Blue, fabricação alemã.

As análises realizadas pelo espectrofotômetro não tiveram a necessidade de preparo inicial.

#### **4.5 Processo de adição do carbonato de cálcio**

Uma parte da água residuária foi utilizada para a fabricação do gesso agrícola. Para realizar esse procedimento, primeiramente foi determinado o pH da água. O pH encontrado foi ácido para todos os tratamentos. Com o objetivo de elevar o pH da água, foi adicionado o carbonato de cálcio, produzindo o sulfato de cálcio, por meio da reação:



Os elementos foram determinados pelo aparelho de ICP OES, Espectrômetro de Emissão Atômica com plasma indutivamente acoplado, Marca, Spectro, modelo Blue, fabricação alemã. Para essa análise, não foi necessário um preparo anterior também.



## **5 ANÁLISE ESTATÍSTICA**

Os dados foram avaliados em delineamento bloco casualizado, tendo sido realizada análise de fatorial, ambos a 5% de significância. Para os elementos acidez, cálcio, enxofre, magnésio, metais pesados (chumbo, cádmio, arsênio e cromo), sem alterações com a queima, foi realizado teste de média. Para os dados de quantidades de raspa de pneu, acidez, cálcio, enxofre, magnésio, metais pesados (chumbo, cádmio, arsênio e cromo) e pH, foram utilizados análise de variância e teste de média tuckey, ambos a 5% de significância.



## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1 Partículas de borracha de pneu**

As partículas de pneu utilizadas neste trabalho são um material de comprimento que variado e não passaram por nenhum tratamento prévio.

### **6.2 Água sem tratamento**

Na tabela 3, são apresentados os resultados das análises de água na entrada do efluente no lavador de gases, sem a queima da raspa do pneu inservível.

Tabela 3 – Níveis dos elementos na entrada do lavador de gás.

<b>Média das águas neutralizada e sem neutralizar</b>									
	Ca	Mg	S (Sulfato)	Acidez	pH	Cd	Pb	Cr	As
<b>Água utilizada (mg/l)</b>	0,166	0,006	0,13 mg/l	10	7,46	0,02 mg/l	0,01 mg/l	0,01 mg/l	0,05 mg/l
<b>Normativa</b>	-	-	250 mg/l	-	6 a 9	0,2 mg/l	0,5 mg/l	0,01mg/l	0,5 mg/l

Legenda: Ca – Cálcio, Mg- Magnésio, S – enxofre, pH – potencial hidrogênio, Cd – cádmio, Pb – chumbo, Cr-cromo, As – Arsênio.

É possível observar que a água apresenta condições próprias para o consumo, de acordo com a resolução do Conama (2005), que estabelece limites para a água especial classe 1, que são as águas de consumo humano, desinfetadas. Os limites para enxofre, cálcio e magnésio apresentam valores dentro dos padrões e, para acidez e pH, estão de acordo. Nota-se que todas as concentrações se encontram dentro dos valores recomendados para águas de classe 1, segundo a Resolução n.º: 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente.

Os valores obtidos pelos metais pesados estão dentro dos padrões da Resolução do Conama n.º: 397/2008. Os valores de cádmio, chumbo, arsênio, cromo encontrados nas águas naturais estão em concentrações muito baixas, mas é importante destacar que esses metais apresentam elevado tóxico.

### **6.3 Água residuária**

A tabela 4 apresenta o resultado das análises de variância para as características avaliadas nas diferentes águas. Observa-se que o efeito da interação pneu x água foi significativo para todas os elementos analisados (enxofre, cálcio, magnésio, acidez e pH).



Tabela 4 - Resumo das análises de variância.

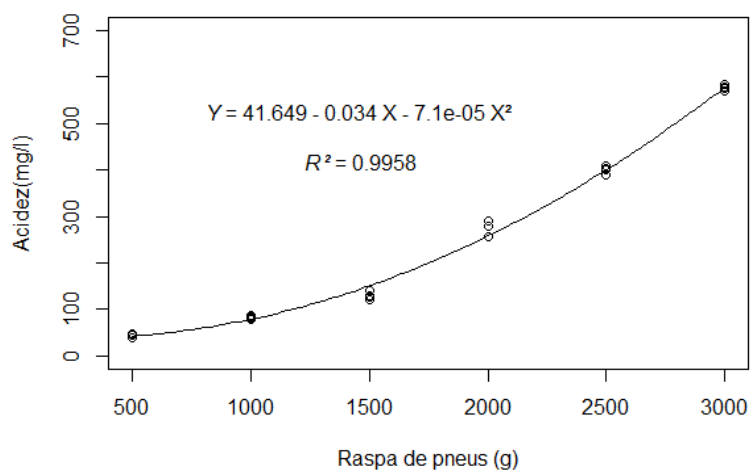
FV	GL	Quadrado Médio				
		pH	Acidez	S (Sulfato)	Mg	Ca
<b>Quantidade de raspa de pneu</b>	5	6,434*	86106*	4079511*	1,525*	48258*
<b>Águas(L)</b>	1	209,376*	708102*	20547178*	143,099*	37345134*
<b>Quantidade de raspa de pneu x Água</b>	5	6,296*	86295*	2359267*	0,720*	46540*
<b>Resíduo</b>	36	0,074	38	76	0,001	187
<b>Total</b>	47					
	CV(%)	4,9	4,7	0,13	1,29	1,54

FV: Fator de Variação; GL: Grau de liberdade; pH: potencial hidrogênio; S: Enxofre na forma de sulfato; Mg: Magnésio; Ca: Cálcio; CV: Coeficiente de Variação; \*: significativo a 5% pelo teste F.

### 6.3.1 Acidez

No gráfico 1, referente à acidez, observa-se que a adição da queima das raspas de pneu está relacionada com o aumento do teor de acidez da água. Mostrando os valores da acidez média para cada quantidade de raspa de pneu queimada em mg/l, iniciando em 500 gramas de raspa; pode-se observar que, com o aumento da raspa de pneu, ocorre o acréscimo da acidez da água no local de armazenamento. Esse fator pode ser atribuído devido à presença de grande quantidade de compostos de enxofre presentes na água, liberado no processo de queima do pneu inservível.

Gráfico 1 – Teor de acidez presente na água residuárias sem neutralizar.



Não existe uma normativa que determine o nível aceitável de acidez em água; por isso, não foi possível fazer uma analogia.

Ao adicionar o carbonato de cálcio, foi possível diminuir, em níveis consideráveis, o teor de acidez na água, nas diferentes porções de gramas de

raspa de pneu queimado, deixando evidente a diferença entre os tipos de água também.

Na tabela 5 encontram-se os valores médios, considerando o desdobramento da interação entre pneu e água, da amostragem e vice-versa, com o respectivo teste de comparação múltipla.

Tabela 5 – Valores médios e teste de interação realizado para avaliar quantidade de pneu na águas residuária

Raspas de pneu (g)	Grupo	Tratamento	Médias (mg/l)
500	A	2	44,75
	B	1	9,25
1000	A	2	82,25
	B	1	9,25
1500	A	2	129
	B	1	9,5
2000	A	2	278,25
	B	1	8,75
2500	A	2	400,75
	B	1	8,75
3000	A	2	577,25
	B	1	9,25

As relações analisadas foram estatisticamente diferentes. Percebeu-se o efeito de carbonato de cálcio na correção da água ácida, o que provocou a redução da acidez consideravelmente, deixando a água sem condições de corrosão.

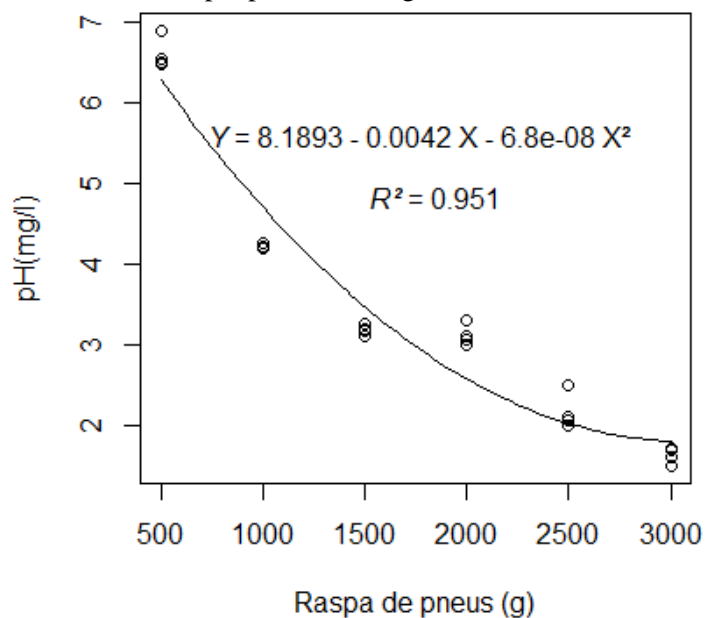
### 6.3.2 pH

O parâmetro pH se configura como um dos mais importantes com relação ao saneamento ambiental. Ele é amplamente utilizado para a caracterização das águas fluviais, ou efluentes, entre outros. O pH está relacionado à atividade hidrogeniônica, ou seja, à concentração de íons (H e

OH), caracterizando a intensidade de ácidos em uma solução (SANCHES, 2014).

Ao avaliar o de pH da água, relacionado também às quantidades de raspas de pneu queimadas, percebe-se que é decrescente. A cada adição de raspa de pneu, observa-se que o pH diminui chegando até em torno 1, como é observado no gráfico abaixo.

Gráfico 2- pH presente na água residuária sem neutralizar.



De acordo com a Resolução do Conama n.º: 357/2005, as águas próprias para o consumo devem estar com o pH em torno de 6 a 9; as águas da queima superior a 1000 gramas tornam-se impróprias para o consumo ou emprego em outras áreas.

O que é atribuído ao baixo valor de pH são também, as quantidades elevadas de enxofre que a água contém, devido ao processo de queima de pneu, que libera compostos.

Também o efeito indireto é muito importante, podendo, em determinadas condições de pH, contribuir para a precipitação de elementos químicos tóxicos, como metais pesados; outras condições podem exercer efeitos sobre as solubilidades de nutrientes. Dessa forma, as restrições de faixas de pH são estabelecidas para as diversas classes de águas naturais, de acordo com a Legislação Federal. O decréscimo no valor do pH, que a princípio funciona como indicador do desequilíbrio, passa a ser causa, se não for corrigido a tempo. É possível que alguns efluentes industriais possam ser tratados biologicamente em seus valores naturais de pH, por exemplo, em torno de 5,0 (COMPANHIA, DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2009).

Dessa forma Richter e Netto, (2006) afirmaram que água com pH baixo torna-se corrosiva para certos tipos de metais e, em contrapartida, o pH alto tende a formar incrustações.

Para Souza (2007), as incrustações têm influência de variáveis, como temperatura, sais insolúveis ou óxidos, pH, qualidade da água e condições hidrodinâmicas.

Na faixa de pH correspondente à água atmosférica (pH 2 a 6), a maior parte do  $\text{SO}_2$  dissolvido encontra-se na forma do íon sulfito,  $\text{HSO}_3^-$ . A conversão das espécies de sulfito a sulfato via solução aquosa apresenta uma química complexa e depende de diversas variáveis, o que inclui: concentração de espécies oxidantes, presença de íons metálicos, tamanho e composição da gota e condições meteorológicas.

Na tabela 6 encontram-se os valores médios, considerando o desdobramento da interação entre pneu e água, e os valores médios de pH. Com

a adição de carbonato de cálcio, os valores de pH obtiveram também o aumento no teor, devido ao carbonato de cálcio ter característica de agente neutralizante.

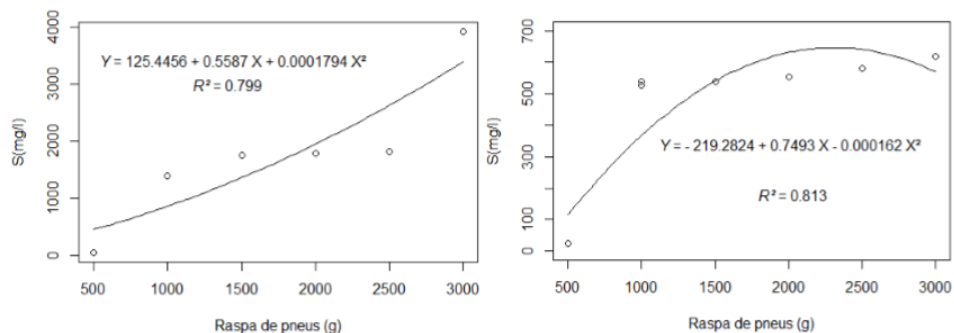
Tabela 6 - Valores médios e teste de interação realizado para avaliar quantidade de pneu na água residuária.

Raspas de pneu (g)	Grupo	Tratamento	Médias (mg/l)
500	a	2	7,73
	b	1	6,60
1000	a	2	7,64
	b	1	4,21
1500	a	2	7,43
	b	1	3,18
2000	a	2	7,85
	b	1	3,11
2500	a	2	7,39
	b	1	2,16
3000	a	2	7,92
	b	1	1,62

### 6.3.3 Enxofre

Os testes de amostragem da água coletada após a queima da raspa de pneu foram simultaneamente analisados pela Espectroscopia de massa. Pode-se observar a elevada concentração do poluente de acordo com o aumento da quantidade da raspa de pneu. No gráfico 3, são mostrados os dados das concentrações do gás poluente  $SO_x$ . Pode-se observar que ocorreu a elevação da concentração desses gases com o aumento da quantidade de raspa de pneu queimado.

Gráfico 3 – Teor de enxofre presente na água residuária sem neutralizar e água residuária neutralizada.



De acordo com a Resolução do Conama, n<sup>o</sup>.: 357, que rege os teores dos elementos em tipos diferentes de água, resolve que para as águas doces, o limite de sulfato total deve ser de 250 mg/l SO<sub>4</sub>. Para todos os níveis de queima, eles ultrapassam essa norma, tornando imprópria para o consumo ou outra forma de utilização sem algum tratamento prévio.

Observa-se o aumento dos teores de sulfato (SO<sub>4</sub>) na água à medida que as concentrações de raspagem de pneu são em maiores quantidades. Esse fato se deve à presença de enxofre na composição do pneu e, segundo Goulart, 2003, o lavador de gases é responsável pela remoção do SO<sub>x</sub> e particulados remanescentes. O enxofre exibe uma boa solubilidade em água, em comparação com outros gases presentes na atmosfera, o que resulta em um enriquecimento de S(IV) na água de chuva, nuvens e neblina (MARTINS et al., 2002). Esse fenômeno ocorre pela fácil junção do elemento de enxofre com o oxigênio. O dióxido de enxofre, SO<sub>2</sub>, além de ser lançado na atmosfera em grandes quantidades pela queima de combustíveis, é o principal produto formado devido à oxidação de todos os compostos de enxofre reduzidos. A oxidação por radical hidroxila tem sido também considerada como a principal reação responsável pela conversão do SO<sub>2</sub> na fase gasosa atmosférica (MARTINS, 2002).

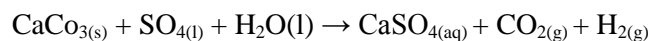
Saliente-se, também, que o incentivo à recuperação do enxofre contido em gases recebeu forte incremento das legislações ambientais internacionais, que penalizam com altas multas os emissores de compostos de enxofre, em razão de futuras chuvas ácidas, haja vista ser mais econômico às empresas o tratamento dos gases sulfurosos do que o pagamento das multas acarretadas pelo seu lançamento à atmosfera, e tendo em conta o aumento das fontes primárias de enxofre, é de supor que os seus preços internacionais tendam a se manter estáveis, ou mesmo em declínio.

Além da possibilidade de múltiplas reações ocorrerem no processo de oxidação de S(IV) a S(VI) em gotas atmosféricas, é necessário considerar os processos físicos envolvendo a retirada de SO<sub>2</sub> da fase gasosa até a transformação final em sulfato na fase aquosa (MARTINS, 2002).

Quando adicionado o carbonato de cálcio à água, o enxofre tende a diminuir, obtendo-se o sulfato de cálcio (CaSO<sub>4</sub>).

Dentro da Resolução do Conama n<sup>o</sup>.: 357, apenas a água proveniente da queima de 500g de raspa de pneu está dentro dos parâmetros de apenas 250 mg/l SO<sub>4</sub>, as demais continuam ainda impróprias para o consumo humano. Porém, podem ser aproveitadas para áreas com fins agrícolas ou na construção civil. Para essa utilização, cabem mais estudos sobre os impactos ambientais.

A partir da queima das 2000g gramas de raspa de pneu, observa-se a redução ainda maior dos teores de enxofre na água. A redução na quantidade de enxofre na água é devida a reação do carbonato de cálcio e a água residuária sem neutralizar; é resultado dessa reação:





### 6.3.4 Magnésio e Cálcio

Os níveis de magnésio e cálcio tiveram pequenas alterações significativas com a queima, pela ausência de rochas calcíneas, como mostra no gráfico 4 e 5.

Esses valores são atribuídos a região de Lavras apresentar pouco teor de rocha calcíneas. Rocha et al (2000), analisou as água da zona rural de Lavras e constatou que as amostras de água da zona rural variaram de 23,91 a 54,13 mg/l em todas as amostras de água limpa (DE LIMA, 2013).

Gráfico 4 – Teor de cálcio presente na água residuária neutralizada.

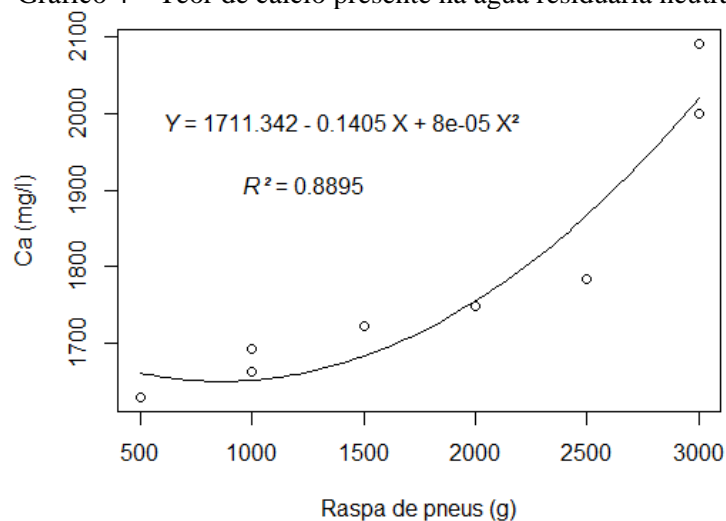
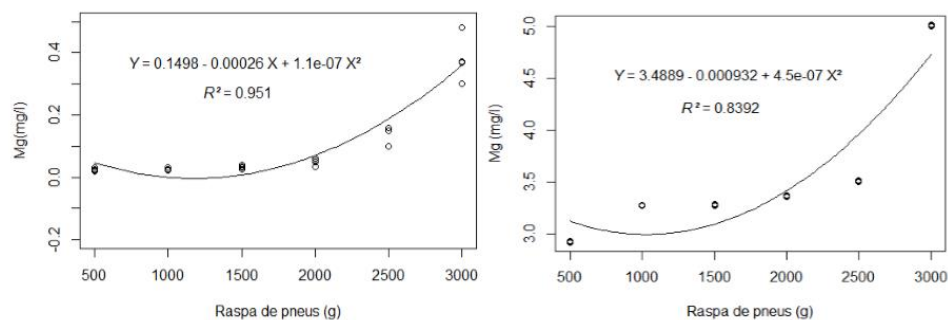


Gráfico 5- Teor de magnésio presente na água residuária sem neutralizar e água residuária neutralizada.



No gráfico 4 e 5, respectivamente de cálcio e magnésio, referente as águas residuárias, mostra que com a adição do carbonato de cálcio, houve o aumento considerável. Tal alteração ocorreu devido à alta concentração de cálcio no carbonato de cálcio, produto necessário para que a água sem neutralizar fosse neutralizada e atingisse o pH desejado.

O cálcio e o magnésio, apesar de não serem abordados pela legislação, mostraram-se muito eficientes na associação à poluição urbana e industrial. (RIBEIRO, 2012).

O cálcio, na forma de seus minerais e rochas, tem uso industrial largamente difundido. Ao lado do magnésio, é o principal fator que determina a dureza da água. (LEE, 2003). O magnésio é encontrado principalmente na água do mar e em minerais, como magnesita e dolomita. Industrialmente, o magnésio é muito usado na composição de ligas junto com o alumínio e na indústria farmacêutica (DE MORAES, 2015).

A presença desses íons na água não tem significado sanitário; porém, podem ser prejudiciais aos usos doméstico e industrial, porque podem dar origem a dureza das águas. Nas tubulações, podem provocar incrustações e, nas caldeiras, reduzir a transferência de calor (JAQUES, 2005).

Na tabela 7, é observado que em todos os tratamentos, a água neutralizada, foi a que teve melhor resultado, em razão de o carbonato de cálcio conter em sua composição este elemento.

Tabela 7 – Magnésio, valores médios e teste de interação realizado para avaliar quantidade de raspa de pneu na água residuária.

Raspa de pneu (g)	Grupo	Tratamento	Médias (mg/l)
<b>500</b>	a	2	40,75
	b	1	23,40
<b>1000</b>	a	2	1383,37
	b	1	530,92
<b>1500</b>	a	2	1749,22
	b	1	540,03
<b>2000</b>	a	2	1784,17
	b	1	554,86
<b>2500</b>	a	2	1815,17
	b	1	581,15
<b>3000</b>	a	2	3938,09
	b	1	619,23

O tratamento de 3000 gramas teve maior concentração, assim como nos demais outros elementos, e também no cálcio.

#### 6.4 Metais pesados

Na tabela 8 é apresentado o resultado das análises de variância para as características avaliadas nas diferentes águas, quando avaliada a concentração de metais pesados. Observa-se que o efeito da interação pneu x água foi significativo para todos os elementos analisados (cádmio, cromo, arsênio e chumbo). Esses elementos estão presentes na composição da borracha do pneu.

Tabela 8 - Resumo das análises de variância dos metais pesados.

<b>Quadrado Médio</b>						
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Ar</b>	<b>Pb</b>	
<b>Quantidade de raspa de pneu (P)</b>	6	0.0062731*	2.15298*	0.00016800*	0.0099637*	
<b>Água (L)</b>	1	0.0002161*	0.00016*	0.00053333*	0.0003413*	
<b>Quantidade de raspa de pneu x água</b>	6	0.0002014*	0,00036*	0.00078933*	0.0050517*	
<b>Resíduo</b>	46	0.0000442*	0,00009*	0.00007222*	0.0003667*	
<b>Total</b>	55					
	CV (%)	8,11	0,8	0,3	1,76	

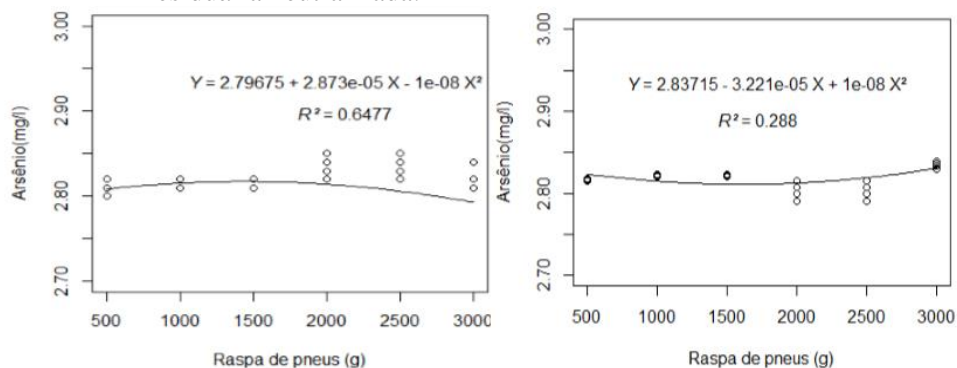
FV: Fator de Variação; GL: Grau de liberdade; Cd: Cádmio; Cr: Cromo; As: Arsênio; Pb: Chumbo; \*: significativo a 5% pelo teste F

Esses metais se tornam tóxicos e perigosos para a saúde humana quando ultrapassam determinadas concentrações limite, uma vez que o chumbo, o mercúrio, o cádmio, o cromo e o arsênio são metais que não existem naturalmente em nenhum organismo, tampouco desempenham funções nutricionais ou bioquímicas, em microrganismos, plantas ou animais. Desde quando o homem descobriu a metalurgia, a produção desses metais aumentou e seus efeitos tóxicos geraram problemas de saúde permanentes, tanto para seres humanos como para o ecossistema (PESSON, 1979; NAIME et al., 2005).

#### 6.4.1 Arsênio

Nas amostras para o elemento arsênio, a quantidade de raspa de pneu queimada teve pouca influência quanto à quantidade desse elemento presente na água sem neutralizar. A quantidade desse elemento na água neutralizada, teve pequenas alterações, como observado no gráfico 6.

Gráfico 6 – Teor de arsênio presente na água residuária sem neutralizar e água residuária neutralizada.



Quando analisado o gráfico 6, observa-se que os valores não sofrem alterações consideráveis, mesmo após a adição do carbonato de cálcio. A quantidade desse metal presente é tóxica quando comparada à Resolução do Conama, n.º: 397, que determina que a água torna-se contaminada se o elemento estiver acima de uma concentração de 0,5mg/l. Em todos os níveis de raspa de pneu queimadas, apresentam concentrações elevadas, o que as tornam impróprias para o consumo ou descartada sem algum tratamento prévio.

O arsênio ocorre nas águas de forma natural; entretanto, altos valores podem estar associados à utilização de fungicidas, inseticidas, herbicidas, resíduos industriais e proteção de madeiras. Tornando necessária sua prevenção em águas superficiais ou subterrâneas voltadas para o abastecimento doméstico. (NASCIMENTO, 2005).

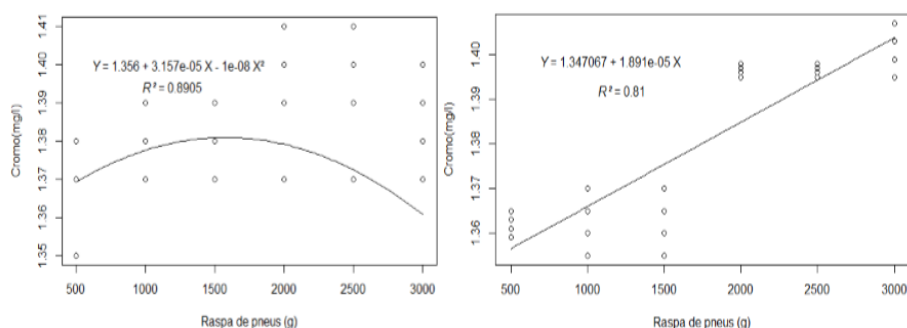
#### 6.4.2 Cromo

Abaixo foram representados os gráficos do elemento cromo nas diferentes águas; o cromo analisado foi o cromo trivalente, tendo como

referência a Resolução do Conama, n.º: 397/2008. A normativa prevê que os níveis máximos desse elemento em água seja de 1 mg/l.

Analisando o gráfico 7 é possível observar que, na água sem neutralizar, os níveis desse elemento, tem a máxima concentração, de 1,40 mg/l, e quando comparada à água neutralizada, este nível é de 1,38 mg/l. Na água neutralizada é observado também o decréscimo desse elemento, porém, para a água neutralizada e sem neutralizar ocorre a contaminação em todos os níveis de pneu queimado.

Gráfico 7 – Teor de cromo presente na água residuária sem neutralizar e água residuária neutralizada.

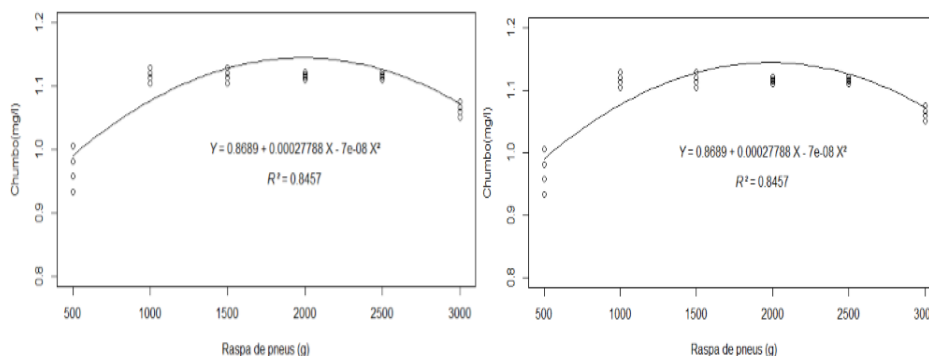


O cromo, assim como outros metais, exerce um efeito prejudicial sobre os processos biológicos, já que atua sobre as enzimas catalisadoras da síntese de proteínas, responsáveis do metabolismo. Os microrganismos só podem suportar concentrações de alguns miligramas por litro. Muitos dos metais pesados tendem a formar compostos insolúveis que precipitam a solução. Como só os íons solúveis são tóxicos para os sistemas enzimáticos bacterianos, as características químicas do meio são decisivas para determinar a toxicidade dos diferentes metais pesados (NAIME et al., 2005).

### 6.4.3 Chumbo

No gráfico 8, foram representados os gráficos do elemento chumbo nas diferentes águas, tendo como referência a Resolução do Conama, n.º: 397/2008. A normativa prevê que os níveis máximos desse elemento em água seja de 0,5 mg/l. Analisando o gráfico, é possível observar que, na água sem neutralizar e água neutralizada, os níveis desse elemento tem a máxima concentração em torno de 1,07 mg/l, ao comparar esses valores, o chumbo também apresenta níveis elevados de contaminação.

Gráfico 8 – Teor de chumbo presente na água residuária sem neutralizar e água residuária neutralizada.



Deve-se lembrar que o chumbo é um metal ligado à poluição e é tóxico, acumulativo e sem função biológica conhecida, tanto para as plantas como para os seres humanos. Formas orgânicas tóxicas desse metal estão também presentes no meio ambiente a partir de fontes diretas, além da possível metilação química/biológica de chumbo inorgânico em sedimentos anaeróbios. Uma fração significativa de chumbo insolúvel pode ser incorporada em material particulado de superfície de escoamento, como íons sorvidos (adsorvidos e absorvidos) ou ainda na cobertura de superfície em sedimentos. A maior parte do chumbo é

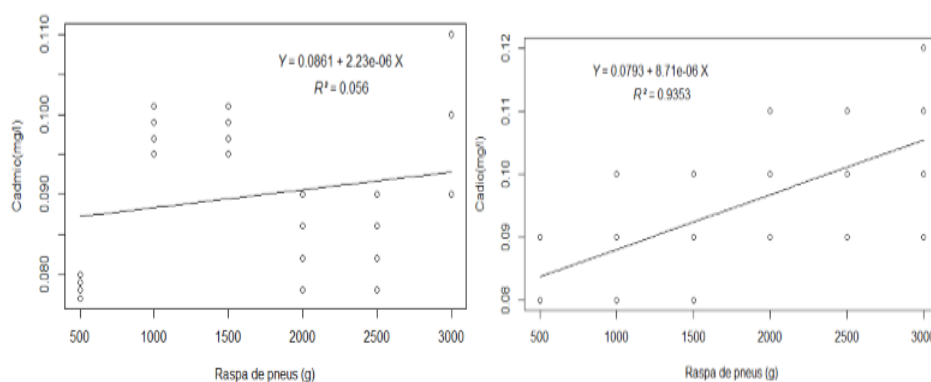
retida nos sedimentos e muito pouco é transportado em águas de superfície ou subterrâneas (SADIQ, 1992; ALLOWAY, 1995; COTTA, 2006).

#### 6.4.4 Cádmi

Abaixo foi representado o gráfico do elemento cádmio nas diferentes águas, tendo como referencia a Resolução do Conama, n.º: 397/2008. A normativa prevê que os níveis máximos desse elemento em água sejam de 0,2 mg/l.

Analisando o gráfico 9, é possível observar que, na água sem neutralizar e água neutralizada, os níveis desse elemento tem a máxima concentração de 0,110mg/l, o que, para o elemento cádmio, não apresenta valores de contaminação.

Gráfico 9 – Teor de cádmio presente na água residuária sem neutralizar e água residuária neutralizada.





O consumo desta água sendo para fins agrícolas ou não, será necessário remover os elementos tóxicos, visando que, mesmo em baixas concentrações, eles podem ser nocivos à saúde da população, e também fontes poluidoras.

A presença natural de cádmio no meio ambiente, aparentemente, não tem causado problemas significativos para a saúde humana, pois encontra-se em baixas concentrações. Porém, a ampla utilização na indústria faz com o cádmio seja um dos mais frequentes contaminantes do meio ambiente (GALVÃO; COREY, 1987; Muniz, 2008).

## 7 CONCLUSÃO

O filtro de lavagem de gases resultantes da queima de pneus inservíveis mostrou-se eficiente, considerado o fato de que as emissões do elemento enxofre puderem ser contidas por meio da aspersão de água, reduzindo os teores desse elemento de forma significativa.

O filtro mostrou ainda eficiente também para a retenção de metais pesados.

A remoção dos metais pesados, para tratamento da água residuária, deverá ser objeto de outros estudos.

A adição de carbonato de cálcio à água de lavagem dos gases mostrou-se eficiente para a captura do enxofre disponível na forma de sulfato, obtendo-se o sulfato de cálcio.

## REFERÊNCIAS

ACRE. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais. **Inventário de resíduos sólidos Industriais do Estado do Acre**. Rio Branco, 2004. 23 p.

ADHIKARI, B.; DE, D.; MAITI, S. Reclamation and recycling of waste rubber. **Progress in Polymer Science**, Emsford, v. 25, p. 909-948, 2000.

AMBIENTE BRASIL. **Reciclagem de pneus**. 2007. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=residuos/index.php3&conteudo=./residuos/reciclagem/pneus.html>>. Acesso em: 18 fev. 2014.

ANDRADE, H. S. **Pneus inservíveis: alternativas possíveis de reutilização**. 2007. 100 p. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

ARAÚJO, S. M. S. de. A ação do estado e o meio ambiente no polo gesso do araripe nos anos de 1990 e 2000. **Rios Eletrônica: Revista Científica da FASETE**, Paulo Afonso, ano 7, n. 7, p. 91-102, dez. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004: resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004: resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **Ecopontos**. São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.anip.com.br/>>. Acesso em: 10 mar. 2015.

AZEVEDO, L. C. de O. **Efeito econômico da reciclagem de pneus para a sociedade brasileira**. 2011. 43 p. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas)-Instituto de Ensino e Pesquisa, Faculdade de Economia e Administração, São Paulo, 2011.

AZUAGA, D. **Danos ambientais causados por veículos leves no Brasil**. 2000. 168 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

BARBOSA, T. A. F. **Pneu verde: desafios para equilibrar conforto, segurança e baixo consumo de combustível**. 2013. 98 p. Monografia (Especialização em

Engenharia Automotiva)-Escola de Engenharia Mauá, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2013.

BELGIORNO, V. et al. Energy from gasification of solid waste. **Waste Management**, Oxford, v. 23, p. 1-15, 2003.

BERTOLLO, S. A. et al. Pavimentação asfáltica: uma alternativa para a reutilização de pneus usados. **Revista Limpeza Pública**, São Paulo, v. 54, p. 23-30, 2002.

BIDONE, F. R. A. B.; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. São Paulo: EESC/USP, 1999. 109 p.

BODÉNAN, F.; DENIARD, P. H. Characterization of flue gas cleaning residues from european solid waste incinerators: assessment of various ca-based sorbent processes. **Chemosphere**, Oxford, v. 51, p. 335-347, 2003.

BRANCO, S. M.; PORTO, R. la L.; CLEARY, R. W. **Hidrologia ambiental**. São Paulo: EDUSP/ABRH, 1991. 425 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, CETESB, 20050810).

BRASIL. Resolução CONAMA n° 03/90, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, DF, 22 ago. 1990. Seção 1, p. 15937-15939.

BRASIL. Resolução CONAMA n° 258, de 26 de agosto de 1999. Determina que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final ambientalmente adequadas aos pneus inservíveis. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, DF, n. 230, p. 39, 2 dez. 1999.

BRASIL. Resolução CONAMA n° 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, DF, n. 66, p. 66-68, 2008.

BRASIL. Resolução CONAMA n° 397, de 3 de abril de 2008. Altera o inciso II do § 4o e a Tabela X do § 5o, ambos do art. 34 da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA n° 357, de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, DF, n. 66, p. 68-69, 7 abr. 2008. Seção 1.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 401, de 4 de novembro de 2008. Estabelece os limites máximos de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias comercializadas no território nacional e os critérios e padrões para o seu gerenciamento ambientalmente adequado, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, DF, n. 215, p. 108-109, 2008.

BRASIL. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, DF, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005.

CANÇADO, J. E. D. et al. Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, São Paulo, v. 32, p. S5-S11, 2006. Suplemento 1.

CANETTI, A. **Alteração da floresta urbana, poluição atmosférica e crescimento diamétrico de Araucária angustifolia (Bertol.) Kuntze em polo industrial**. 2015. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CARPIO, R. C.; SILVA, R. J.; JORGE, A. B. Otimização da mistura de combustíveis secundários alternativos visando atender as restrições operacionais e ambientais em fornos de cimenteiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 35., 2003, Natal. **Anais...** Natal: SBPO, 2003. 1 CD-ROM.

CHIANG, B. C.; WEY, M. Y.; YEH, C. L. Control of acid gases using a fluidized bed absorber. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. B101, p. 259-272, 2003.

CHIBANTE, V. M. A. G. **Aplicação de ciclones de recirculação à lavagem de gases ácidos**. 2012. 234 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química e Biológica)-Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012.

CONEZA, V. F. **Guia metodologica para la evaluacion del impacto ambiental**. 3. ed. Madrid: Mundi, 1998. 412 p.

CONTI, M. A. de. Gestão dos resíduos sólidos: estudo de caso em Santa Rosa/RS. In: EXPOSIÇÃO DE EXPERIENCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO, 19., 2015, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas, 2015. 1 CD-ROM.

COSTA, A. S. V. **Produção de gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) para construção civil oriundo da reação do  $\text{CaCO}_3$  residual da indústria de celulose e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  residual de fábrica de baterias automotiva.** 2012. 16 p. Monografia (Graduação em Agronomia)-Universidade Vale do Rio Doce, Três Corações, 2012.

COTTA, J. A. O.; REZENDE, M. O. O.; PIOVANI, M. R. Avaliação do teor de metais em sedimento do Rio Betari no parque estadual turístico do alto ribeirão-petar, São Paulo, Brasil. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 40-45, 2006.

CUNHA, R. M. P. da. **Estudo do transporte de poluentes na região do Polo Petroquímico, localizado em Triunfo-RS.** 2002. 155 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento remoto e Meteorologia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

DERISIO, J. C. **Introdução ao controle de poluição ambiental.** 4. ed. atual. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 223 p.

DI GIULIO, G. Vantagens ambientais e econômicas no uso de borracha em asfalto. **Inovação Uniemp**, Campinas, v. 3, n. 3, p. 12-15, 2007.

DIAS, R. R. et al. **Controle de poluição utilizando lavador venturi: a influência da injeção de líquido.** 2007. Disponível em: <<http://bt.fatecsp.br/system/articles/628/original/023.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2015.

DOURADO, D. C. **Poder calorífico e análise elementar de pneus automobilísticos inservíveis e de frutos da macaúbeira.** 2011. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

DOWLATSHAHI, S. Developing a theory of reverse logistics. **Interfaces**, Guarapuava, v. 30, n. 3, p. 143-155, 2000.

DRUMM, F. C. et al. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Salvador, v. 18, n. 1, p. 66-78, 2014.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Scrap tire handbook:** EPA/905-k-001. Washington, DC, 1987. 1987

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. S.; BAYER, C. Modificações químicas em solos ácidos ocasionadas pelo método de aplicação de corretivos da acidez e de gesso agrícola. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 4, p. 825-831, out./dez. 2001.

FAUSTINO, O. W. C.; LEITE, E. F. Desenvolvimento sustentável e o fenômeno do empreendedorismo com pneus inservíveis: um estudo de caso na “Pneu Verde”. **Holos**, Natal, v. 5, p. 344-360, 2014.

FIGUEIREDO, R. B. **Utilização de resíduos de borracha em pavimentações asfálticas ecológicas**. 2012. 40 p. Monografia (Especialização em Construção Civil)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

FIGUEIREDO, M. G.; SANTOS, M. S.; FERRARI, L. R. Estação de tratamentos de efluentes das indústrias têxteis: otimização através da implantação de medidas de prevenção à poluição. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2000. 1 CD-ROM.

GALVÃO, L. A. C.; COREY, G. **Arsenico**. México: OPS; OMS, 1987a. 70 p. (Serie Vigilância, 3).

GALVÃO, L. A. C.; COREY, G. **Cadmio**. México: OPS; OMS, 1987b. 69 p. (Serie Vigilância, 4).

GALVÃO, L. A. C.; COREY, G. **Cromo**. México: OPS; OMS, 1987c. 66 p. (Serie Vigilância, 5).

GAMA, M. S. de C. **Estudo de um sistema de limpeza de gases usando um lavador venturi de seção circular**. 2008. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

GARDIN, J. A. C.; FIGUEIRÓ, P. S.; NASCIMENTO, L. F. Logística reversa de pneus inservíveis: discussões sobre três alternativas de reciclagem para este passivo ambiental. **Revista Gestão e Planejamento**, Salvador, v. 11, n. 2, p. 232-249, 2010.

GOBBI, A. J. D. **Reaproveitamento de pneus inservíveis como fonte de energia e matéria-prima**. 2002. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)-Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

GODINHO, M. **Gaseificação e combustão de resíduos sólidos da indústria calçadista**. 2006. 106 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Mineral/Metalurgia Extrativa)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

GOMES, J. F. P. **Poluição atmosférica: um manual universitário**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2010. 266 p.

GOODYEAR DO BRASIL. **História da borracha e dos pneus** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <ana.pereira551@gmail.com> em 19 jan. 2003.

GOULART, E. A. **Reciclagem energética de pneus automotivos em reator de leito fluidizado: uma proposta para a questão ambiental**. 1999. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

GOULART, E. A. A utilização da gaseificação de pneus usados em leito fluidizado para a produção de energéticos. **Polímeros**, São Carlos, v. 9, n. 4, p. 123-128, out./dez. 2003.

GROSSI, R. C. et al. Determinação dos parâmetros cinéticos significativos para a reação de caustificação. In: CONGRESSO IBEROAERIANO DE INVESTIGACIONEN CELULOSA Y PAPEL, 2000, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires, 2000. p. 120-124.

HEESE, H. et al. Competitive advantage through take back of used products. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 164, n. 1, p. 143-157, 2005.

HENKES, J. A.; RODRIGUES, C. M. Reciclagem de pneus: atitude ambiental aliada à estratégia econômica. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Palhoça, v. 4, n. 1, p. 448-473, 2015.

HOLCIN BRASIL S/A. **Plano de controle ambiental de co-processamento de pneus**. Pedro Leopoldo, 1998. 7 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Instrução Normativa nº 008**, de 18 de setembro de 2003. Disciplina o procedimento para a aplicação de sanções administrativas por condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e para a defesa e o sistema recursal e a cobrança de créditos de natureza tributária e não tributária para com a Autarquia. Brasília, DF, 2003.



INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Pneus novos e reformados**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/imprensa/releases/pneusRefor.asp>>. Acesso em: 12 ago. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria nº 133, de 2 de outubro de 2001. Aprova o Regulamento Técnico para pneus reformados. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, DF, n. 189, p. 60, 2 out. 2001. Seção 1.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Portaria nº 444**, de 19 de novembro de 2010. Aprova a revisão dos Requisitos de Avaliação da Conformidade para o Serviço de Reforma de Pneus. Brasília, DF, 2010. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/pam/pdf/PAM005560.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2015.

JAQUES, R. C. **Qualidade da água de chuva no município de Florianópolis e sua potencialidade para aproveitamento em edificações**. 2005. 102 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 113 f. Tese (Livre Docência em Engenharia Civil)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KAMIMURA, E. **Potencial de utilização dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil**. 2002. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

KOCH, M. et al. Reaction mechanism of a single calcium hydroxide particle with humidified HCl. **Chemical Engineering Science**, New York, v. 60, p. 5819-5829, 2005.

LAGARINHOS, C. A. F. **Reciclagem de pneus**: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa. 2011. 291 p. Tese (Doutorado em Engenharia)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

LAGARINHOS, C. A. F. et al. Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 106-118, 2008.

LEE, J. D. **Química Inorgânica não tão concisa**. São Paulo: E. Blucher, 2003. 544 p.

LEITÃO, M. A. S. Gesso: conhecimento e uso na engenharia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 33., 2005, Campina Grande. **Anais...** Recife: UFPE, 2005. p. 8.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed., rev. e ampl. Campinas: Átomo, 2010. 494 p.

LIMA, M. T. A. de et al. Avaliação das características físico-químicas da água na zona rural do município de parselas utilizadas para produção animal. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFRN, 9., 2013, Natal. **Anais...** Natal, 2013. p. 248-255.

LOPES, E. J. **Desenvolvimento de sistema de gaseificação via análise de emissões atmosféricas**. 2014. 146 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

MAGALHÃES, L. C. **Estudo do material particulado atmosférico e metais associados às partículas totais em suspensão na cidade de Ouro Preto, MG**. 2005. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)-Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

MARCATTO, C. **Educação ambiental: conceitos e princípios**. Belo Horizonte: FEAM, 2002. 64 p.

MARCHIORI, H. **Estudo de viabilidade da aplicação de pneus como combustível na geração de energia elétrica**. São Paulo: EDUSP, 2008. 58 p. Relatório final.

MARTINS, C. R.; ANDRADE, J. B. de. Química atmosférica do enxofre (IV): emissões, reações em fase aquosa e impacto ambiental. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 259-272, 2002.

MERCHANT, A. A.; PETRICH, M. A. Pyrolysis of crap tires and conversion of chars to activated carbon. **AIChE Journal**, New York, v. 39, n. 8, p. 1370-1376, 1993.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01**, de 5 de maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos e água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Belo Horizonte, 20 maio 2008. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8151>>. Acesso em: 10 mar. 2015.

MONTEIRO, L.; MAINIER, F. Queima de pneus inservíveis em fornos declínquer. **Engevista**, Niterói, v. 10, n. 1, p. 52-58, 2008.

MORAES, L. H. F.; ROSSI, M. V. Avaliação da qualidade da água pela determinação de ânions por cromatografia de íons nas pequenas centrais hidroelétricas de São José e São Joaquim. **Revinter**, Revista de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade, v. 4, n. 2, p. 5-18, 2015.

MORALES, M. G. et al. Viscous properties and microstructure of recycled eva modified betumen. **Fuel**, London, v. 83, p. 31-38, 2004.

MOTTA, F. G. A cadeia de destinação dos pneus inservíveis: o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 167-184, 2008.

MUNIZ, D. H. de F.; OLIVEIRA-FILHO, E. C. Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente. **Universitas: Ciências da Saúde**, Brasília, v. 4, n. 1, p. 83-100, 2008.

NAIME, R.; FAGUNDES, R. S. Controle da qualidade da água do arroio Portão, Portão-RS. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v. 32, n. 1, p. 27-35, 2005.

NASCIMENTO, S. A. de M.; BARBOSA, J. S. F. Qualidade da água do aquífero freático no alto cristalino de Salvador, Bacia do Rio Lucaia, Salvador, Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 35, p. 543-550, 2005.

NOHARA, J. J. et al. **GS-40-resíduos sólidos**: passivo ambiental e reciclagem de pneus. 2006. 38 p. Tese (Doutorado em Administração)-Univesidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, M. P. et al. Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. In: CONFERENCIA BRASILEIRA DE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO-CONVENCIONAIS:

HABITAÇÃO E INFRAESTRUTURA DE INTERESSE SOCIAL BRASIL - NOCMAT, 2004, Pirassununga. **Anais...** Pirassununga: EDUSP, 2004. p. 1-15.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Guidance manual on environmentally sound management of waste**. Paris, 2007. 69 p.

PERES, L. Potencialidades do pólo gesso do Araripe. In: SIMPÓSIO PÓLO GESSEIRO DO ARARIPE: POTENCIALIDADES PROBLEMAS E SOLUÇÕES, 2014, Recife. **Anais...** Recife, 2014. 1 CD-ROM.

PESSON, P. **La contaminación de las aguas continentales**. Madrid: Mundi, 1979. 574 p.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2006. 285 p.

RAMOS, K. C. S.; RAMOS FILHO, L. S. N. A logística reversa dos pneus inservíveis. **Anuário da Produção Acadêmica Docente**, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 91-104, 2008.

RIBEIRO, D. V.; MORELLI, M. R. **Resíduos sólidos: problema ou oportunidade**. São Paulo, SP: Interciência, 2009. 135 p.

RIBEIRO, E. V. et al. Metais pesados e qualidade da água do Rio São Francisco no segmento entre Três Marias e Pirapora-MG: índice de contaminação. **Revista Geonomos**, Belo Horizonte, v. 20, n. 1, p. 49-63, 2012.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETO, J. M. A. **Tratamento de água**. São Paulo: E. Blucher, 1991. 29 p.

ROCHA, A. F. et al. **Cádmio, chumbo, mercúrio: a problemática destes metais pesados na saúde pública**. 2009. 63 p. Monografia (Graduação em Ciências da Nutrição e Alimentação)-Faculdade de Ciências da Nutrição e Alimentação, Universidade de Porto, Porto, 2009.

ROCHA, M. B. M. C. et al. Avaliação da qualidade da água e percepção higiênico-sanitária na área rural de Lavras, Minas Gerais, Brasil. **Caderno de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 9, p. 1967-1978, set. 2006.

ROCHA, M. S. R.; LEMME, R. F. F. **Inservível como combustível em fornos de cimenteiras, sob a ótica das emissões de CO<sub>2</sub>**. 2013. 79 p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

RODRIGUES, B. E. **Estudo da estabilidade das propriedades mecânicas e químicas de compostos de borracha vulcanizadas com enxofre após envelhecimento térmico e oxidativo**. 2010. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SADIQ, M. **Toxic metal chemistry in marine environments**. New York: M. Dekker, 1992. 390 p.

SANCHES, S. M. et al. Vigilância e controle da qualidade da água do Córrego Pirapitinga no município de Ituiutaba-MG. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 6, n. 3, p. 71-82, 2014.

SANTI, A. M. M. **Incineração de resíduos industriais**. 1995. 62 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

SÃO PAULO (Estado). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem: qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo**. São Paulo, 2009.

SCHMITT FIGUEIRÓ, P.; GARDIN, A. C. J.; NASCIMENTO, L. P. Logística reversa de pneus inservíveis: discussões sobre três alternativas de reciclagem para este passivo ambiental. **Gestão & Planejamento**, Salvador, v. 11, n. 2, p. 232-249, 2011.

SELLITTO, M. et al. Coprocessamento de cascas de arroz e pneus inservíveis e logística reversa na fabricação de cimento. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 16, n. 1, p. 141-162, 2013.

SILVA, J. A. A. da. Potencialidades de florestas energéticas de Eucalyptus no polo gesseiro do Araripe-Pernambuco. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, Recife, v. 5, p. 301-319, 2013.

SILVA, R. J. da. **Otimização no coprocessamento de resíduo industrial de cimento envolvendo custos, qualidade e impacto ambiental**. 2000. 194 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2000.

SILVESTRAVICIUTE, I.; KARALIUNAITE, I. Comparison of end-of-life tyre treatment technologies: life cycle inventory analysis. **Environmental Research, Engineering and Management**, Kaunas, v. 35, 52-60, 2006.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual**. Rio de Janeiro, 1995.

SOUZA, F. A. **Co-processamento de resíduos industriais**. Rio Branco do Sul: Votorantim Cimentos, 2007. 30 p.

STUDART, T. M. C.; CAMPOS, J. N. B. Incertezas nas estimativas da vazão regularizada por um reservatório. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n. 3, p. 81-94, 2001.

TRUCKEEMERCANTILE. **History on Charles Goodyear**. Disponível em: <<http://truckeemercantile.com/crasher-info-on-charles-goodeyar/>>. Acesso em: 12 jan. 2011.

VELOSO, Z. M. F. **Ciclo de vida dos pneus**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2013. 24 p.

VERDONE, N.; FILIPPIS, P. Reaction kinetics of hydrogen chloride with sodium carbonate. **Chemical Engineering Science**, New York, v. 61, n. 22, p. 7487-7496, 2006.

VIEIRA, G. E. G. et al. O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto: uma revisão. **Revista Liberato**, Nova Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 81-95, 2011.