

3 Reciclagem de pneus

3.1. O pneumático

Há anos a humanidade vem desfrutando de um invento que proporciona conforto, eficiência e segurança nos veículos em geral. O pneu, tecnicamente conhecido como pneumático, consiste em um tubo de borracha cheio de ar que, ajustado ao aro de uma roda, permite a locomoção do veículo absorvendo os impactos com o solo.

Os pneumáticos são encontrados em diversos veículos. São vistos com mais frequência nos automóveis, ônibus, motocicletas, bicicletas e caminhões. Porém, podem ser encontrados também em aviões, tratores agrícolas, equipamentos de construção e movimentação de materiais. Existem ainda os chamados pneus “maciços”, formados de borracha sólida, encontrados em alguns veículos industriais, agrícolas e militares.

O pneumático de um veículo automotor serve para suportar carga, assegurar a transmissão da potência automotriz, garantir dirigibilidade e respostas eficientes nas freadas e acelerações e contribuir, junto com as suspensões, para o conforto dos ocupantes.

O pneu é basicamente formado por quatro partes (Fapemig, 2003):

Carcaça – parte interna do pneu, responsável por reter a pressão causada pelo ar e sustentar o peso do veículo. Possui lonas de poliéster, aço ou nylon, dispostas no sentido diagonal uma das outras, nos chamados pneus convencionais ou diagonais, ou na forma radial, nos pneus ditos radiais. Os pneus radiais ainda contam com uma estrutura adicional de lonas, chamadas de cintura, que estabilizam a carcaça radial. Essas lonas são constituídas de aço.

Talão – serve para acoplar o pneu ao aro. Possui uma forma de anel e é constituído de arames de aço, recobertos por borracha.

Flancos – parte lateral do pneu e tem a função de proteger a carcaça. É constituída de borracha com alto grau de elasticidade.

Banda de rolagem - parte que entra em contato com o solo. Os desenhos formados nessa parte são chamados de esculturas. Possuem partes cheias e partes vazias e servem para otimizar a aderência com a superfície. É feita com compostos de borracha altamente resistentes ao desgaste.

Conforme dito acima, a disposição da carcaça divide o tipo de pneu entre radial e diagonal. Atualmente, a produção do pneu radial é cada vez maior. Nos veículos de passeio, os pneus radiais já somam 97% do mercado, enquanto nos ônibus e caminhões esse número fica em 45%. Apesar de mais caros, eles apresentam maior resistência e eficiência do que os pneus diagonais. Além do reforço na estrutura geral, o maior teor de borracha natural e os novos desenhos na banda de rodagem contribuem para essa superioridade (Andrietta, 2002).

Existe ainda a classificação dos pneus em “com câmara” e “sem câmara”. Os sem câmara apresentam na parte interna da carcaça uma camada adicional de uma borracha especial. Os pneus sem câmara são considerados mais vantajosos por serem mais fáceis de desmontar e montar e por eliminarem o ar mais lentamente quando perfurados.

3.2. Composição

Segundo Andrietta (2002), a borracha é o principal material do pneu, representando cerca de 40% do seu peso. Essa borracha pode ser dividida em dois tipos:

Natural: Sua principal extração vem de uma derivada da seringueira - hevea brasiliensis. A produção de pneus representa um terço do consumo mundial de borracha.

Sintética: Tipo de elastômeros, polímeros com propriedades físicas parecidas com a da borracha natural. É derivada do petróleo ou do gás natural. Seu consumo para a fabricação de pneus representa 2/3 do total de borracha sintética no mundo.

Além da borracha, existem, como matéria prima do pneu, o negro de carbono ou negro de fumo, fibras orgânicas - nylon e poliéster, arames de aço, derivados do petróleo e outros produtos químicos.

Essencial na construção do pneumático, a adição de negro de fumo deixa a borracha mais resistente e aumenta seu desempenho. Através de um método chamado vulcanização, a borracha é misturada ao negro de fumo num molde aquecido entre 120 a 170 graus Celsius e a eles são adicionados enxofre, compostos de zinco e outros aceleradores de processo.

Considerado difícil de reciclar, o negro de fumo vêm sendo substituído pela sílica na construção dos chamados “pneus ecológicos”.

A Figura 7 mostra um tipo de pneu radial e as Tabelas 3 e 4 apresentam respectivamente o percentual de produtos e materiais que compõem o pneu.

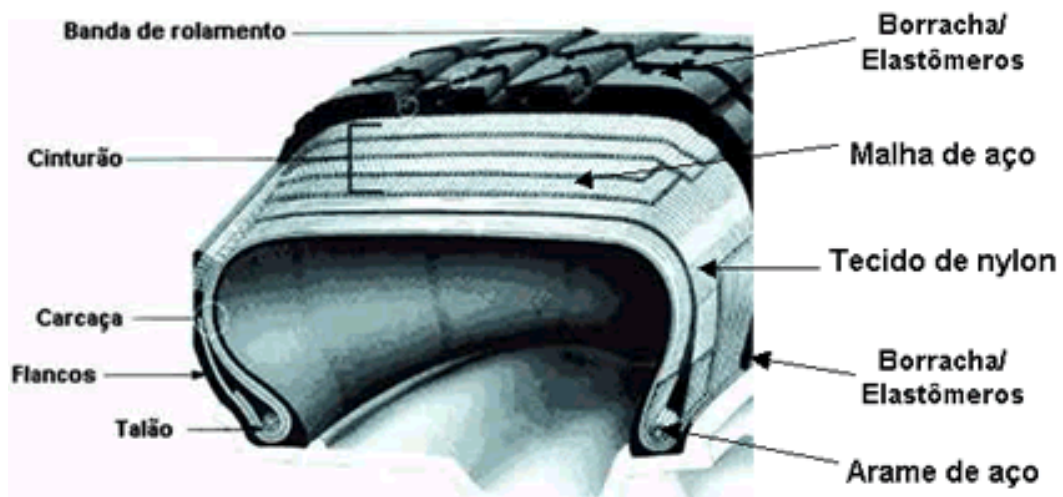


Figura 7 : Composição química média de um pneu (Andrietta, 2002).

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

Tabela 3: Composição química média de um pneu (Andrietta, 2002).

	Automóvel	Caminhão
Material	%	%
Borracha / Elastômeros	48	45
Negro de fumo	22	22
Aço	15	25
Tecido de nylon	5	-
Óxido de Zinco	1	2
Enxofre	1	1
Aditivos	8	5

Tabela 4: Comparação dos materiais contidos em pneus (Andrietta, 2002).

3.3. Ciclo de vida do pneu

O ciclo de vida do pneu consiste basicamente de cinco estágios: extração, produção, consumo, coleta dos pneus descartados e gerenciamento da destinação do lixo. A configuração detalhada do ciclo de vida varia de acordo com a economia local e as condições vigentes das instituições.

3.3.1. Extração e produção

Na fase da extração, são gerados os componentes básicos do pneu. Como já foi descrito acima, esses componentes, como a borracha natural e sintética, o aço,

tecidos em geral, e aditivos químicos, variam de proporção de acordo com o tipo de pneu e ser construído.

No processo de manufatura, conforme ilustrado na Figura 8, o pneu é inserido em uma das três classificações: novo, recauchutado ou reutilizado. A fabricação de um pneu novo requer processos de alto nível tecnológico, além de consumir altas doses de recursos, como mão-de-obra – chegando a representar 30% do custo total – e energia (Beukering & Janssen, 2001).

A recauchutagem trata de um método mais simples, pois somente recoloca a parte da borracha gasta na banda de rolagem. Esse método, como será visto adiante, preserva cerca de 80% da matéria-prima e energia necessária para a fabricação de um novo pneu.

Já a reutilização direta não é realmente um processo de manufatura. Chamada também de remoldagem, ela é aplicada somente para pneus de caminhões. Trata-se de um processo de alongamento da vida útil do pneu, cujo custo representa 2.5% do custo total do pneu novo.

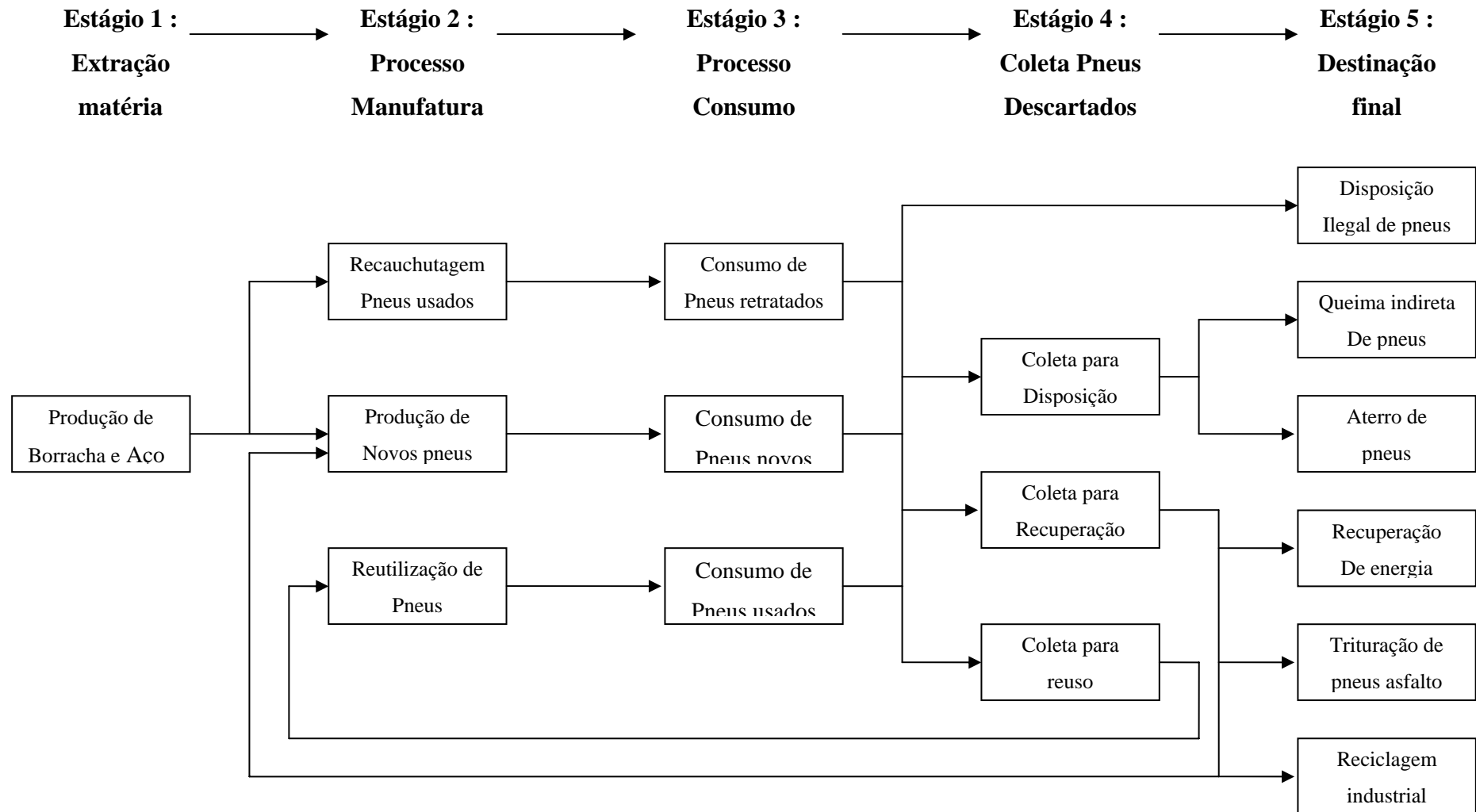


Figura 8 : Ciclo de vida do pneu (Beukering & Janssen, 2001).

3.3.2. Consumo

O comportamento dos motoristas e a negligência quanto à correta calibragem da pressão interna do pneu são os principais fatores na performance durante seu consumo. Nos últimos 40 anos, as melhorias no processo de fabricação fizeram com que os pneus duplicassem sua vida útil.

Entretanto, a rápida aceleração e desaceleração do automóvel, sem contar as condições das estradas, fazem a taxa de aproveitamento do pneu diminuir consideravelmente.

Ainda de acordo com Beukering e Janssen (2001), um pneu, se utilizado de maneira razoável, pode rodar em média 100.000 quilômetros. No final desse tempo, ele chega a perder 10% de seu peso. A maioria do material dissipado vem da banda de rolagem, parte que fica em contato com o solo, recomposta na recauchutagem.

3.3.3. Gerenciamento da coleta e destinação dos pneus descartados

Os pneus usados são considerados atualmente um dos maiores problemas ambientais do mundo. Existem hoje mais de três bilhões de pneus inservíveis dispostos inapropriadamente no planeta. De acordo com Blumenthal (2002), o número de pneus inservíveis não pára de crescer nos EUA. De 1999 até 2001, os pneus descartados pela sociedade subiram de 177.5 milhões para 215 milhões de unidades.

Os pneus dispostos a céu aberto são considerados, por diversas razões, mais agressivos ao meio ambiente. Além de poluir visualmente o ambiente, eles podem liberar substâncias tóxicas na atmosfera, contaminar o ar e até mesmo provocar incêndios, exalando fumaça altamente prejudicial.

A coleta de pneus é considerada um estágio separado no ciclo de vida. Os pneus são descartados quando trocados por um novo ou quando os próprios carros já não servem mais. Em muitos países, os pneus são levados para centros de coleta. Em alguns países, como na Holanda, os consumidores são obrigados a pagar para deixar os pneus nesses centros.

Os pneus chegam nesses locais de coleta como um destino final. O ciclo de vida do material terminou. A partir daí, verifica-se para qual finalidade cada pneu servirá. Pneus que apresentarem alguma condição de uso serão enviados para a recauchutagem. Aqueles que não tiverem essa característica serão aproveitados como energia, ou reciclados para aproveitamento de matéria-prima. No caso dos EUA e certos países da Europa, alguns pneus são encaminhados para exportação, normalmente para países do terceiro mundo, onde a legislação permite a compra do material.

Como os materiais constituintes do pneu são considerados grandes fontes energéticas, eles também são usados como combustível nas indústrias cimenteiras. Em países como Áustria, Alemanha, França e Suécia, mais de 65% dos pneus descartados são usados como fonte energética.

Entretanto, no mundo, a maior parte dos pneus descartados continuam indo parar em aterros sanitários.

Existem ainda aterros que contêm somente pneus. Esses são mais aceitáveis do que os aterros comuns, pois permitem melhor recuperação energética e de matéria-prima do produto. Podem até se tornar no futuro centros de coleta de pneus. Entretanto, devido às substâncias inflamáveis presente no produto, esses depósitos correm riscos de incêndio, que podem causar danos à sociedade, rios, matas e atmosfera.

O grande problema no gerenciamento de pneus usados é a disposição ilegal do material. Pneus que não possuem mais condições de recuperação são largados em qualquer lugar. Países como EUA, Canadá, Holanda e Reino Unido, que passaram a cobrar taxas nos postos de coleta, notaram o aumento do problema. As centrais de coleta recebiam as taxas e os pneus deixados nas agências de carro. As centrais ficam com os pneus recuperáveis e se desfazem do resto.

3.4.

Mercado de Pneus

Dentre os dez maiores fornecedores da indústria automobilística, quatro são fabricantes de pneumáticos: Bridgestone / Firestone, Michelin, Goodyear e Continental. No Brasil, as empresas com grande expressão mundial que dominam o mercado de automóveis e comerciais leves são: Bridgestone / Firestone, Pirelli e Goodyear. A Michelin, junto com as três empresas citadas acima e algumas outras

fábricas nacionais dividem o mercado interno de pneus utilizado em veículos de carga.

Uma grande característica da indústria de pneumático é o intenso investimento em novas tecnologias. Algumas chegam a gastar cerca de 3,5% do faturamento em pesquisa e desenvolvimento de tecnologia. Elas mantêm centros de pesquisas onde são criadas e testadas as inovações.

Por pressões legais ou não, hoje uma das maiores preocupações de toda a indústria do setor de pneumático é o meio ambiente. Diversos estudos são feitos para obter um pneu mais leve e com menos atrito, para reduzir o consumo de combustível e conseqüentemente reduzir as emissões na atmosfera. Do ponto de vista ambiental, a maior durabilidade do pneu é um aspecto positivo, pois diminui o volume de material a ser reaproveitado.

É possível estimar a demanda de pneus ao se considerar que esta é uma função da frota de automóveis e de sua quantidade produzida por ano. Considerando que cada automóvel troque em média uma vez por ano os pneus, devido ao desgaste, pode-se estimar o mercado de reposição de pneus, e conseqüentemente a quantidade de pneus descartados.

Outro grande investimento atualmente realizado é o aumento de borracha natural e diminuição do negro de fumo na composição total do pneu. Enquanto a borracha natural é mais fácil de ser reciclada do que a sintética, a adição de negro de fumo, por meio da vulcanização, forma uma ligação permanente entre o enxofre e o carbono, dificultando a reciclagem total do material.

3.4.1. A Guerra dos Pneus

Walter Tegani, presidente da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos do Brasil (ANIP), informa que no ano de 1998, existiam de três a quatro bilhões de pneus dispostos inapropriadamente no mundo (Osava, 2001). De lá pra cá, 800 milhões de novos pneus são produzidos anualmente.

A maioria da produção está concentrada nos Estados Unidos e na União Européia. Na Europa, devido à falta de espaço para disposição de pneus inservíveis, diversas formas de reciclagem vêm sendo estudadas. A maior parte

dos pneus descartados em ambas as regiões, 39% na Europa e 31% nos EUA, continuam indo parar em depósitos subterrâneos.

Enquanto os EUA exportam 5% dos pneus descartados, a Europa mantém a taxa de 11%. Trata-se de uma forma de ‘exportação de problemas’, uma vez que transferem problemas para outros, geralmente países em desenvolvimento como o Brasil.

Para conter esse problema, o Brasil lançou uma lei impedindo a importação de pneus inservíveis. Entretanto, teve que abrir exceções em relação aos pneus vindo do Uruguai e da Argentina, a fim de não ferir acordo do Mercosul. Dessa forma, os países que compõem o Mercosul acabaram por servir de transbordo no envio de pneus provenientes da América do Norte e Europa, uma vez que estes mandam para os países do Mercosul, que os revendem para o Brasil.

A regulamentação reduziu consideravelmente a importação de pneus recuperados, que passou de 3,4 milhões em 1998 para menos de 1 milhão em 2001, enquanto a importação de pneus inservíveis diminuiu de 6.2 milhões em 1996 para 2.4 milhões em 2001 (Osava, 2001).

Francisco Simeão, presidente da Associação Brasileira da Indústria de Pneus Remoldados - ABIP, afirma que os pneus importados são bastante aproveitados nos métodos de reciclagem, e diz que a tentativa de barrar as importações deve-se a pressões de multinacionais que dominam o mercado doméstico. Ele insiste que os pneus importados apresentam melhores condições de reaproveitamento do que os brasileiros, porque a legislação de qualidade é mais rigorosa nos outros países do que no Brasil.

Entretanto, Tegani afirma que o Brasil também exporta pneus para a Europa, portanto qualidade não seria o problema. Para ele, as importações são estimuladas pelo baixo preço de venda dos pneus usados, uma vez que é de interesses dos vendedores se verem livre do produto. Ele afirma que o Brasil precisa estudar formas de diminuir os custos de transporte dos pneus descartados do próprio país, para estimular o reaproveitamento dos pneus do mercado interno.

Nessa guerra dos pneus, o Brasil vem se posicionando à frente do resto dos países no que diz respeito à responsabilidade ambiental dos fabricantes do produto. O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Lei 257/99, estabelece que todos os fabricantes ou importadores de pneus devem dar fim adequado aos seus produtos. Essa lei começou a vigorar em 2002 e tem as

seguintes premissas: em 2002 os responsáveis deveriam reciclar 25% dos pneus produzidos no ano. Em 2003 esse número deverá ser de 50%. Em 2004 serão obrigados a reciclar 100% e finalmente, em 2005, com o propósito de acabar com o passivo de 100 milhões de pneus descartados inapropriadamente no país, as empresas deverão reciclar 125% do total da produção (ABIP, 2003).

Segundo Tegani, com a nova lei, dos 45 milhões de pneus produzidos em 2002, sendo que desse total 15 milhões foram exportados, 7 milhões de pneus já deveriam ser reaproveitados. Como se trata de uma lei nova, ainda não se tem o número exato da quantidade de pneus reaproveitados em 2002 (Bressan, 2003).

Ao contrário de outros países, no Brasil os custos de coleta, transporte e estoque não serão repassados aos consumidores de pneus. As companhias que utilizarem matéria-prima reciclada absorverão totalmente essas despesas.

3.5. Métodos de reciclagem do pneu

Atualmente, conforme Andrietta (2002), existem dezenas de formas de reciclagem de pneus. As reciclagens cujos processos não alteram as propriedades químicas do material são chamadas de reciclagens mecânicas, como é o caso da reforma e da recuperação.

Já os processos que alteram as composições químicas do pneu são chamados de reciclagem química ou industrial. São exemplos desse tipo a desvulcanização e a pirólise. A seguir serão listados alguns dos processos recicladores de pneus mais utilizados.

3.5.1. Reforma ou recauchutagem

Depois do combustível, os pneus constituem o item de maior custo de uso nos veículos. Devido a isto, a recauchutagem foi desenvolvida com o objetivo de reformar um pneu usado, repondo e vulcanizando a camada superior de borracha da banda de rolamento.

Para isso, é necessário que a estrutura geral do pneu esteja conservada, não apresentando cortes ou deformações, e a banda de rodagem ainda apresente os sulcos e saliências que permitem sua aderência ao solo.

Infelizmente, as estradas brasileiras não facilitam muito esse processo. Por causa das precárias condições das mesmas, o pneu tem sua vida útil reduzida significativamente.

Uma outra limitação para esse tipo de reciclagem é a econômica, uma vez que a reforma de um pneu de caminhão custa em torno de um terço de um novo. Já um pneu reformado de automóvel pode custar até 60% de um novo.

Apesar das dessas limitações, o Brasil é um dos maiores remoldadores de pneus do mundo. Para se ter uma idéia, embora o Produto Interno Bruto – PIB – brasileiro seja inferior a 5% do PIB americano, os Estados Unidos reformam apenas o dobro de pneus remoldados, recauchutados ou reformados no Brasil, com 23 mil toneladas mensais. O Brasil vêm em segundo colocado com 11 mil toneladas mensais. A Associação dos Recauchutadores, Reformadores e Remoldadores – ABR – revela que o setor movimenta cerca de R\$ 3,2 bilhões por ano, gerando uma economia anual de R\$ 600 milhões de derivados de petróleo (Gazeta Mercantil, 2003).

3.5.2. Recuperação

A recuperação consiste na simples trituração dos pneus e moagem dos resíduos, reduzidos a pó fino. A borracha contida nos resíduos, na forma vulcanizada, não sofre modificação e não é separada dos demais compostos.

Os pneus recuperados geralmente seguem dois tipos de utilização :

- Na mistura com asfalto para a pavimentação de vias e pátios de estacionamento. Da trituração, as partículas não maiores que 5 mm e com umidade de no máximo 2% são misturadas ao asfalto na proporção de 1% a 3% em peso.
- Nas fábricas de cimento, o produto da moagem, com partículas de 1 a 6 mm, podendo chegar a 50-500 *micras*, é incinerado no forno como combustível e a fumaça proveniente dos gases produzidos pela queima é incorporada ao cimento.

A borracha recuperada e triturada, por já se encontrar no estado vulcanizado, não pode ser utilizada como substituto da borracha crua na produção de artefatos. Entretanto, devido ao seu custo reduzido e baixo peso específico, pode ser empregado como elemento de carga na produção de saltos e solados de calçados, mangueiras, tapetes para automóveis, entre outros (Andrietta, 2002).

3.5.3. Regeneração ou desvulcanização

As carcaças dos pneus se enquadram na classificação de resíduos que contêm fibras em elevadas proporções. A regeneração é feita por vários processos - alcalino, ácido, mecânico e vapor superaquecido. Na regeneração, os resíduos passam por modificações que os tornam mais plásticos e aptos a receber nova vulcanização, mas não têm as mesmas propriedades da borracha crua, sendo geralmente misturado a ela para a fabricação de artefatos. No processo de regeneração, a borracha é separada dos outros componentes e desvulcanizada, o arame e a malha de aço são recuperados como sucata de ferro qualificada, o tecido de nylon é recuperado e utilizado como reforço em embalagens de papelão.

Nesse processo, o pneu é picado em pedaços e colocado num tanque com solvente para que a borracha inche e se torne quebradiça. Em seguida, os pedaços são pressionados para que a borracha se desprenda da malha de aço e do tecido de nylon, e um sistema de ímãs e peneiras separa a borracha, o aço e o nylon. A borracha é moída e separada num sistema de peneiras e bombas de alta pressão, passando para um reator ou autoclave onde ocorre a desvulcanização da borracha, recuperando cerca de 75% de suas propriedades originais. A borracha segue para um tanque de secagem onde o solvente é recuperado, retornando ao processo (Fukumori *et al.*, 2002).

No laboratório de Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, está sendo desenvolvido um novo processo de desvulcanização. Com um solvente mais acessível e de menor custo, pretende-se tornar o processo atual menos complexo e viável para menores escalas de produção (Fapemig, 2003).

Diversas são as formas de utilização da borracha regenerada de pneus, como tapetes, pisos industriais e quadras esportivas, sinalizadores de trânsito, rodízios para móveis, carrinhos etc. Até mesmo na recauchutagem de pneus, no

revestimento de tanques de combustível, e como aditivo em peças de plásticos, aumentando-lhes a elasticidade.

3.5.4. Pirólise genérica

A pirólise é, desde meados da década de 1990, o processo mais utilizado na reciclagem de pneus. Considerada uma destilação destrutiva, visa reaproveitar componentes do pneu como matérias-primas ou combustíveis.

A seguir são descritos o processo genérico da pirólise e algumas de suas implementações conhecidas no Brasil e em outros países.

O processo de pirólise pode ser genericamente definido como sendo o de decomposição química por calor na ausência de oxigênio. Os resíduos que alimentam o reator pirolítico podem ser provenientes do lixo doméstico, de resíduos plásticos e outros resíduos industriais (Geocities, 2003).

O processo consiste na trituração destes resíduos previamente selecionados. Após esta etapa, são levados ao reator pirolítico onde, através de uma reação endotérmica, ocorrerão as separações dos subprodutos em cada etapa do processo. O reator pirolítico possui três zonas específicas, a saber:

1. **Zona de secagem.** Local onde ocorre a secagem dos resíduos que irão alimentar o reator. Esses resíduos atravessam duas etapas, a pré-secagem e a secagem propriamente dita. A temperatura no ambiente pode variar de 100° a 150° C. A secagem dos resíduos é extremamente relevante no processo como um todo, uma vez que a umidade interfere negativamente no processo pirolítico.
2. **Zona de pirólise.** Local das reações químicas. Ocorre a volatilização, a oxidação e a fusão. As temperaturas variam de 150° a 1600° C. Nesse processo também ocorre a coleta dos produtos - álcoois, óleo combustível, alcatrão, entre outros.
3. **Zona de resfriamento.** Onde ocorre a coleta dos resíduos, gerados pelo processo da pirólise. Podem ser citados o char, as cinzas e escória.

Existem variados tipos de reatores pirolíticos em operação, com tecnologias diversas para a extração de subprodutos e dos resíduos obtidos no processo.

O objeto problema do trabalho trata da reciclagem de pneus por pirólise com xisto. Como será mostrado adiante, a Petrobrás, através de seu programa PETROSIX, visa a obtenção de óleo e gás natural dos pneus por meio da utilização do xisto.

Além desses, ainda existem os processos de pirólise SVEDALA / METSO, a pirólise de pneus com reator catalítico secundário e a pirólise PKA / Toshiba.

3.5.5.

Pirólise de pneus com xisto – PETROBRÁS

Desde 1998 a Petrobrás, por meio do projeto PETROSIX, instalou uma usina de reprocessamento conjunto de xisto e pneus descartados para a produção de óleo e gás natural, graças à tecnologia desenvolvida pela própria empresa e reconhecida mundialmente. A empresa localiza-se em São Matheus do Sul, no Paraná, onde a exploração de xisto betuminoso já ocorria há alguns anos.

Esse processo será descrito mais adiante, pois se trata da última etapa da logística reversa do pneu no estudo de caso apresentado.

3.5.6.

Outros tipos de disposição do pneumático

Como já foi mencionado anteriormente, pneus descartados de maneira inapropriada podem causar diversos transtornos para a sociedade. É considerado inapropriado lançar pneus a céu aberto, nos campos, matas, rios, córregos, lagos ou até mesmo em áreas desérticas.

Sua forma de tubo retém água e favorece a proliferação de insetos nocivos transmissores de doenças, como a dengue. Além disso, os pneus contêm substâncias tóxicas que podem ser liberadas na atmosfera e contaminar o solo, lençóis freáticos e cursos de água.

Os pneus servem também como combustível para a indústria de cerâmica. Por não possuir nenhum tipo de tratamento na queima, a fumaça liberada na atmosfera também representa riscos para a sociedade.

Pneus inteiros também são utilizados como forma de reaproveitamento. Eles podem ser usados como proteção antichoque em cais de atracação de embarcações. Entretanto, eles podem reter água, deterioram-se com os choques e a ação da água e do sol.

Além disso, são usados como proteção de encostas e taludes, além das encostas de rios em regiões urbanas. Enchendo os pneus com terra, funciona como uma solução de baixo custo, geralmente empregada em regiões de baixa renda.