



Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Centro de Tecnologia e Ciências  
Faculdade de Engenharia  
Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente  
Mestrado em Engenharia Ambiental



REAPROVEITAMENTO DE PNEUS INSERVÍVEIS COMO FONTE DE ENERGIA  
E MATÉRIA-PRIMA

Almir José Diogo Gobbi

Orientadora: Elisabeth Ritter  
Co-orientador: João Alberto Ferreira

Rio de Janeiro  
2002

REAPROVEITAMENTO DE PNEUS INSERVÍVEIS COMO FONTE DE ENERGIA E  
MATÉRIA-PRIMA

Almir José Diogo Gobbi

Trabalho Final submetido ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada por:

---

Prof<sup>a</sup>. Elisabeth Ritter, D.Sc. - Presidente  
PEAMB/UERJ

---

Prof. João Alberto Ferreira, D.Sc.  
PEAMB/UERJ

---

Prof<sup>a</sup>. Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc.  
PEAMB/UERJ

---

Prof<sup>a</sup>. Maria Cristina Moreira Alves, D.Sc.  
EE/UFRJ

Rio de Janeiro  
2002

GOBBI, ALMIR JOSÉ DIOGO

Reaproveitamento de Pneus Inservíveis como Fonte de Energia e Matéria-Prima [Rio de Janeiro] 2002.

xi, 67 p. 29,7 cm (FEN/UERJ, Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial, 2002.)

Dissertação - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

1. Reaproveitamento de Pneus
  2. Disposição Final
  3. Conceito 4 R's
  4. Fonte de Energia e Matéria-Prima
- I. FEN/UERJ II. Título (série)

## **RESUMO**

### Reaproveitamento de Pneus Inservíveis como Fonte de Energia e Matéria-Prima

Desde a invenção da roda, tivemos em nossas vidas um aumento considerável de subprodutos indesejáveis, particularmente os pneus. A disposição final dos pneus inservíveis tornou-se um dos principais problemas ambientais em todo mundo, desafiando os fabricantes a buscarem alternativas de destinação final adequada para estes pneus. A fim de minimizar este problema ambiental, este trabalho tem como objetivo apresentar algumas alternativas de reaproveitamento dos pneus inservíveis, seja como fonte de energia, seja como matéria-prima, associando cada uma delas ao conceito dos 4 R's, ou seja, Redução, Reutilização, Reciclagem e Recuperação Energética. Conclui-se que todas as alternativas apresentadas são extremamente importantes pois cada uma delas pode contribuir para a resolução do problema, mas que as alternativas de recuperação energética são as mais viáveis atualmente, pois podem dar uma destinação ambientalmente correta a grandes quantidades de pneus inservíveis com quase nenhuma necessidade de preparação prévia destes pneus.

Palavras-Chave: Reaproveitamento de Pneus, Disposição Final, Fonte de Energia e Matéria-Prima, Redução, Reutilização, Reciclagem, Recuperação Energética

## **ABSTRACT**

### **Reutilize the Remains of Used Tires as a Source of Energy and Raw Material**

Since the invention of the wheel, we have had in our lives a considerable increase of undesirable by products, particularly tires. The final disposal of used tires has turned into one of the biggest environmental problems in the world, challenging manufactures to find adequate ways to dispose the remains. This work will present a few alternative ways to reutilize the remains of used tires to minimize the environmental impact. As a source of energy or as raw material, making the relationship back to the concept of the 4 R's, that is, Reduction, Reuse, Recycling, Recovery. All the presented alternatives are extremely important, for each one of them can contribute for the resolution of this problem, but the most viable alternatives currently are the Recovery ones. They can give the correct environmental solution for large quantities of tire remains without almost any previous preparation of these used tires.

**Key words:** Reutilize the Remains, Dispose the Remains , Source of Energy or as Raw Material, Reduction, Reuse, Recycling, Recovery.

Que Deus possa iluminar a todos nós, seres humanos, para que possamos, todos os dias, buscar soluções ambientalmente corretas para os produtos e serviços, a fim de que os mesmos venham a se tornar menos agressivos ao meio ambiente.

AOS MEUS PAIS

*Simplicio e Zélia*

Pelo carinho e humildade transmitidos e pelos valores ensinados, e que embora distantes, sempre me apoiaram em todos os meus projetos, tanto pessoal, quanto profissional.

A eles, a minha eterna gratidão.

AOS MEUS FILHOS

*Vinícius e Vitor*

Pela paciência que tiveram, em suportar a minha ausência, em muitos momentos, durante todo este trabalho.

A eles, fica aqui, a minha dívida eterna.

À

*Andréa,*

A principal mentora e incentivadora desta idéia, pela paciência comigo e pela perseverança de estar ao meu lado em todos os momentos, me ajudando e me apoiando em todas as decisões.

A ela, o meu carinho e o meu amor.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus orientadores, Elisabeth Ritter e João Alberto Ferreira pela oportunidade, pela paciência e pela dedicação que demonstraram durante todo o trabalho.

Aos Srs. Renato Machado e Ney Jogas, respectivamente Diretor Industrial e Gerente de Produção, ambos da Michelin Pneumáticos Ltda, pela oportunidade que me foi concedida para a realização deste projeto, sem a qual não seria possível sua conclusão.

À Sra. Renata Murad, por todo apoio logístico e técnico dentro da Michelin Pneumáticos Ltda.

Às professoras Denise M. S. Gerscovich e Laura Maria G. da Motta, pela atenção que me deram durante o meu trabalho.

À empresa Holcin Brasil S.A., pelo apoio recebido durante o período deste trabalho.

Ao Sr. Adriano Carvalho, mesmo estando distante, pela ajuda importante que me foi prestada.

Aos meus amigos e professores da 1ª turma de Mestrado em Engenharia Sanitária da UERJ, a todos a minha admiração.

A todos aqueles, mesmo sendo “coadjuvantes”, a participação direta ou indireta foi e sempre será indispensável. Obrigado!

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>v</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>01</b>
<b>2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVO DO TRABALHO</b>	<b>04</b>
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO</b>	<b>09</b>
<b>4. ALTERNATIVAS PARA GERENCIAMENTO DOS PNEUS INSERVÍVEIS</b>	<b>18</b>
4.1 REDUÇÃO	19
4.1.1 Aumento da Vida Útil	20
4.1.2 Pneus Reformados	21
4.2 REUTILIZAÇÃO	24
4.2.1 Pneu-Solo	24
4.2.2 Tapete Pneu	28
4.2.3 Drenagem de Biogás	28
4.2.4 Recifes Artificiais	29
4.2.5 Outras Alternativas	30
4.3 RECLICAGEM	30
4.3.1 Borracha Triturada	30
4.3.2 Regeneração da Borracha	35
4.4 RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA	40
4.4.1 Incineração Energética	41
4.4.2 Pirólise	48
<b>5. DISCUSSÃO DAS ALTERNATIVAS</b>	<b>53</b>
<b>6. CONCLUSÃO</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO 1</b>	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>66</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Atualmente a proteção do meio ambiente tornou-se um sinal de qualidade de vida. A qualidade do meio ambiente passa, particularmente, pela recuperação dos produtos usados, sua reutilização e reciclagem, antes deles começarem a poluir a paisagem. A reciclagem já é uma parte integrante do comércio, e rapidamente se expande. Nos países industrializados, tanto a reciclagem quanto a reutilização são motivadas não só por razões ambientais, mas também por razões econômicas.

Em nossos dias, as indústrias são responsáveis pelos efluentes e resíduos que elas mesmas geram, legalmente e perante o público. A redução, a reutilização, a reciclagem e também a recuperação energética dos resíduos industriais tornaram-se operações inevitáveis dentro da cadeia produtiva de uma empresa moderna.

Com este debate, acentua-se a discussão de que alguns produtos inservíveis começa a ser tratado, urgentemente, de outra forma. Os pneus estão dentro desta categoria de produtos inservíveis.

Estima-se que são descartados nos Estados Unidos 280 milhões de pneus inservíveis anualmente. Em todo o globo terrestre, a estimativa de pneus descartados por ano é superior a 2 bilhões de unidades. Deste volume menos de 20% são reciclados (Morilha, 2002).

Segundo a ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos, o Brasil produz 41,3 milhões de pneus por ano. A produção por categorias é assim distribuída: 4,65 milhões de pneus para caminhões/ônibus, 3,52 milhões para camionetes, 26,2 milhões para automóveis, 3,6 milhões para motos e 3,33 milhões para outros usos. Está previsto um crescimento de 10% no consumo de pneus para 2002.

Estima-se que a frota nacional de veículos automotores gere mais de 30 milhões de pneus inservíveis por ano, e que estes pneus vêm sendo extensivamente dispostos de maneira incorreta no meio ambiente.

O agravamento da situação ocorre pelo fato do pneu, como todo bem de consumo, ser produzido em grande escala nas linhas de produção, ocupar um volume expressivo em função do espaço vazio no centro, e possuir também propriedades elásticas e de baixa biodegradabilidade, propriedades estas necessárias à sua utilização. Estas

propriedades elásticas são obtidas durante a última etapa do processo de fabricação do pneu, denominada de “vulcanização”, que iremos abordar posteriormente.

Por todos estes fatores, a disposição final de pneus em aterros sanitários ou de outra maneira ambientalmente correta traz dificuldades.

Torna-se necessário buscar técnicas e alternativas econômicas e ambientalmente corretas, que possam contribuir para a retirada destes pneus do meio ambiente, em quantidade cada vez mais crescente.

Muitas são as alternativas possíveis para os pneus inservíveis, porém o que ocorre freqüentemente, é que estes pneus são deixados em aterros sanitários ou largados em terrenos baldios a céu aberto, não agregando o reaproveitamento de seus componentes e com danos importantes ligados ao meio ambiente e à saúde, onerando e dificultando a coleta e transporte destes pneus.

Uma vez que estes pneus sejam coletados, as alternativas possíveis podem ser contempladas dentro dos quatro R's, ou seja, Redução, Reutilização, Reciclagem e Recuperação Energética.

Este trabalho visa uma discussão sobre as possibilidades de reaproveitamento de pneus como fonte de energia e matéria-prima.

No Capítulo 2 é apresentada a caracterização do problema dos pneus inservíveis no Brasil e no mundo, bem como o marco inicial desta questão aqui no Brasil com a divulgação da resolução CONAMA 258, em agosto de 1999, onde se estabeleceu a responsabilidade e metas aos próprios fabricantes, para a destinação ambientalmente correta destes pneus. O capítulo mostra ainda os impactos ambientais e à saúde causados pelo descarte inadequado dos pneus inservíveis.

No Capítulo 3 é mostrada a caracterização do produto “pneu”, indicando sua composição aproximada, tanto da borracha quanto do aço que o compõe, seu alto poder calorífico, suas funções e seus métodos de fabricação. É ainda mostrada a relação peso-volume, fator importante que dificulta a coleta e o transporte dos pneus inservíveis. Neste capítulo é definido também o que é um pneu inservível.

No Capítulo 4 são apresentadas as principais alternativas para gerenciamento dos pneus inservíveis, relacionando cada uma delas aos conceitos dos 4 R's, ou seja, Redução, onde o foco está voltado para o aumento da vida útil do pneu; Reutilização, caracterizada pelo reaproveitamento do pneu como um todo; Reciclagem, caracterizada pela transformação do pneu em matéria prima e Recuperação Energética voltada para substituição, em parte, de combustíveis.

No Capítulo 5 é realizada uma discussão ampla envolvendo as vantagens e desvantagens das alternativas, assim como da aplicação da cada uma delas em nosso país. É também mostrada neste capítulo a situação atual do reaproveitamento dos pneus inservíveis no Brasil baseado em números da ANIP (Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos) bem como as tendências atuais deste mercado.

No Capítulo 6 tem-se a conclusão desta dissertação ressaltando-se a importância de gestão de pneus inservíveis adequada às condições e características do país.

## CAPÍTULO 2

### CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVO DO TRABALHO

Até recentemente, a quase totalidade dos pneus inservíveis no Brasil vinha sendo disposta sem nenhum tipo de controle e de forma inadequada no meio ambiente, como resíduo, tornando-se assim um problema crescente e preocupante para a humanidade. Estes pneus se encontravam em diversos locais: nos revendedores, nas recauchutadoras, em residências particulares e principalmente, espalhados na própria natureza.

A resolução CONAMA 258/99, de 26 de agosto de 1999, representa um grande avanço na concepção da gestão de resíduos, responsabilizando o fabricante pelo seu produto, desde a fabricação até o final de sua utilização (do berço ao túmulo). Esta resolução define que, a partir de 2002, os fabricantes de pneus têm o compromisso de dar destinação ambientalmente adequada aos pneus inservíveis. A mesma se baseia nas quantidades produzidas, começando com um percentual de 25%, aumentando gradativamente, e chegando em 2005 a 125% da produção, valor este firmado, para que os fabricantes possam tratar do passivo acumulado durante todos estes anos. Na tabela 1 é mostrado o resumo dos percentuais de reciclagem de pneus inservíveis, de 2002 a 2005.

**Tabela 1** – Resumo da resolução CONAMA 258/99

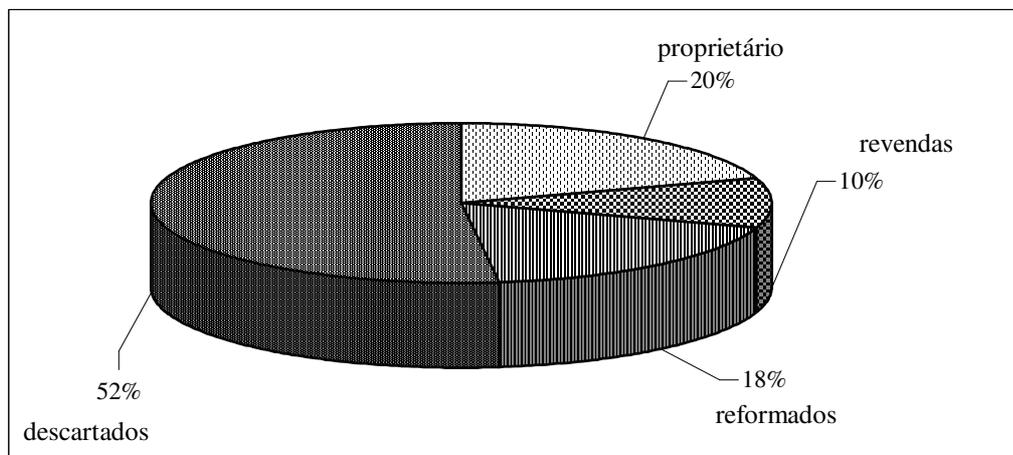
A PARTIR DE...	PNEU NOVO		PNEU REFORMADO	
	PRODUÇÃO	RECICLAGEM	REFORMA	RECICLAGEM
<b>1º de Janeiro de 2002</b>	cada 4 pneus	1 pneu	N.A.	N.A.
<b>1º de Janeiro de 2003</b>	cada 2 pneus	1 pneu	N.A.	N.A.
<b>1º de Janeiro de 2004</b>	cada 1 pneu	1 pneu	cada 4 pneus	5 pneus
<b>1º de Janeiro de 2005</b>	cada 4 pneus	5 pneus	cada 3 pneus	4 pneus

Fonte - CONAMA 258 (1999)

N.A. - Não Aplicável

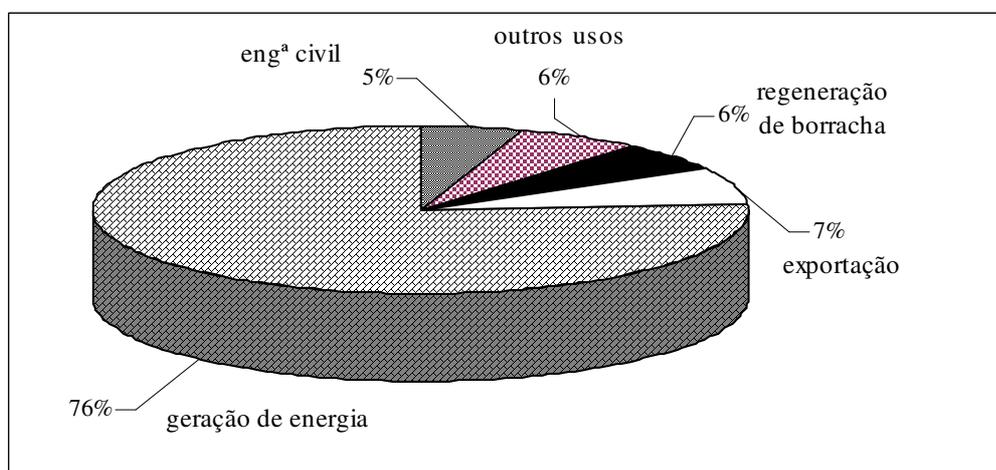
Para se ter uma idéia da importância desta resolução, vale ressaltar que no Brasil, da totalidade dos pneus de automóveis substituídos na rede de revendedores autorizados, cerca de 20% são mantidos com o proprietário. Do restante, que são coletados pelos sucateiros, 10% voltam a pontos de venda, 18% são reformados e 52% são

descartados clandestinamente ou incinerados ilegalmente (Michelin, 2000). O gráfico apresentado na figura 1 visualiza a questão.



**Figura 1** – Situação de pneus inservíveis de automóveis no Brasil  
**Fonte** – Michelin (2000)

Ao contrário, nos Estados Unidos, já em 1998, questões sobre a destinação de pneus inservíveis e algumas soluções possíveis já eram amplamente debatidas. A figura 2 apresenta um gráfico com o destino de pneus nesse país.



**Figura 2** – Destino de pneus inservíveis nos Estados Unidos  
**Fonte** – Blumentahl (1998)

O pneu, como é um material termorrígido, ao ser colocado no meio ambiente, tem uma vida média de 600 anos para se degradar. Durante seu processamento, a borracha, que está presente nos pneus, sofre uma mudança radical em suas características originais, tornando-a apta às necessidades de utilização, porém com enormes dificuldades de

reversibilidade. E estas dificuldades tornam os pneus um problema em potencial para o meio ambiente, quando de sua destinação final, em sua forma original.

Assim, ocorrem 3 tipos de problemas causados pelo descarte de pneus inservíveis de forma indiscriminada no meio ambiente: o impacto ao meio ambiente, os problemas ligados à saúde pública e às dificuldades de coleta e transporte destes pneus, para sua retirada do meio ambiente.

O *impacto ao Meio Ambiente* ocorre quando os pneus são estocados em aterros clandestinos ou mesmo em aterros sanitários. Um risco é o de poluição devido à possibilidade de incêndio, pois os pneus são compostos de material altamente inflamável e podem queimar causando deterioração do meio ambiente. E, se os mesmos são estocados em grande quantidade, existe ainda a dificuldade de se controlar o incêndio, caso ele ocorra. Desta queima emanam fumos negros, oriundos da combustão incompleta, que contribuem para o aumento da presença de CO, SO<sub>2</sub> e material particulado no ar. Além disso, há liberação gasosa de dioxinas, substâncias cancerígenas. A queima de pneus pode ainda contaminar o ambiente com organoclorados, compostos de zinco, cromo, cádmio e chumbo, substâncias estas que entram na composição química do pneu.

Infelizmente, numerosos acidentes já ocorreram com este tipo de material. Entre eles, estão o de Ontário (Canadá), onde 1,5 milhões de pneus queimaram durante 17 dias e em Virgínia (EUA), quando 7 milhões de pneus queimaram durante 8 meses e sua fumaça podia ser vista num raio de 300 quilômetros (Masdoumier, 1994).

Uma prática comum no Brasil é a queima de pneus para espantar mosquitos. Recentemente, no estado do Mato Grosso aconteceu um acidente, onde milhares de pneus queimaram durante mais de 3 horas.

O segundo grande problema se refere à *saúde pública*. O efeito da estocagem de pneus, sem a devida precaução em relação a sua proteção, cria a possibilidade de, ali, se tornar um reservatório de água estagnada e favorecer assim, a proliferação de insetos nocivos e vetores, visto que o pneu, por sua própria geometria, favorece muito o acúmulo de água em seu interior. Atualmente, esta situação é uma das responsáveis pela proliferação do mosquito *Aedes aegypti*, transmissor da dengue, doença tipicamente tropical, e que neste ano de 2002, causou a maior epidemia da doença na história do Rio de Janeiro.

Existe ainda um terceiro problema relacionado à *coleta e ao transporte* destes pneus que constitui um grande obstáculo para a retirada de pneus inservíveis do meio ambiente e dar a eles uma destinação adequada. A grande quantidade, atualmente imensurável, de pneus espalhados por todo o território dificulta a constituição de uma estrutura adequada para o seu recolhimento, de uma forma ambientalmente segura.

Uma vez que se saiba onde existe algum pneu, é preciso recolhê-lo. A relação peso-volume é outro grande problema, pois eles são muito pouco deformáveis e compactáveis. Passa-se a ter um custo muito elevado para o transporte deste material, visto que o mesmo ocupa um volume considerado em relação ao seu peso, contribuindo negativamente na sua valorização.

Os grandes fabricantes, como Michelin, Bridgestone, Goodyear e Pirelli, criaram a ANIP (Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos), que está estudando uma forma de coleta economicamente viável e ambientalmente correta, para que possam atender a Resolução CONAMA Nº 258, de 1999.

É um duplo desafio lançado para todos os fabricantes de pneus. Não se deve apenas produzir pneus que tenham níveis de performance elevados, mas também conseguir agir de maneira pró-ativa para a reutilização de seus produtos após o término da vida útil de utilização.

No Rio de Janeiro já existe uma iniciativa neste sentido. A Michelin, que possui 2 fábricas de pneus no Estado, fechou um acordo com a Comlurb (Companhia Municipal de Limpeza Urbana do município do Rio de Janeiro) e com alguns borracheiros. Foi criada uma Associação de Borracheiros, com mais de 1000 participantes, instalando-se 14 locais denominados de **Ecopneus** e 25 **Ecopontos**, destinados a receber pneus inservíveis. Os Ecopneus situam-se em borracharias, cujos donos se dispuseram a receber pneus inservíveis de comerciantes próximos, em condições ambientalmente adequadas (pneus cobertos, inspecionados e tratados para não se transformarem em criadouros de mosquitos). Os Ecopontos são instalações da Comlurb, criadas para o recebimento gratuito de entulhos de obra e materiais inservíveis transportados por catadores, carroceiros e pela população em geral; são proibidos lixo domiciliar e animais mortos. As carcaças de pneus são transportadas dos Ecopneus e Ecopontos para o Aterro da Comlurb em Bangu, Bairro da Zona Oeste da Cidade do Rio de Janeiro, onde são armazenados, cobertos com lonas e periodicamente inspecionados e tratados para que não ocorra proliferação de mosquitos.

Por fim, a Michelin se responsabiliza pelo encaminhamento destes pneus inservíveis para a queima em indústrias cimenteiras, após a trituração dos mesmos em moinhos especiais.

Hoje em dia, já existem tecnologias ambientalmente seguras para se ter um reaproveitamento destes pneus inservíveis, seja através da valorização da matéria prima, seja pela valorização energética. Porém, as diversas possibilidades devem ainda ser viabilizadas, para que possam ser suficientes e absorver a quantidade cada vez mais crescente destes pneus.

Esse problema é tanto ecológico como econômico, e já está sendo considerado como relevante, por todas as entidades governamentais, ambientais e até empresariais.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma discussão sobre as possibilidades de reaproveitamento de pneus inservíveis, com o enfoque nos 4 R's, redução, reutilização, reciclagem e recuperação energética, sendo que dentro de cada uma destas possibilidades serão discutidas algumas alternativas existentes, bem como uma análise da viabilidade das mesmas, com foco direto no contexto e na realidade brasileira.

## CAPÍTULO 3

### CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO

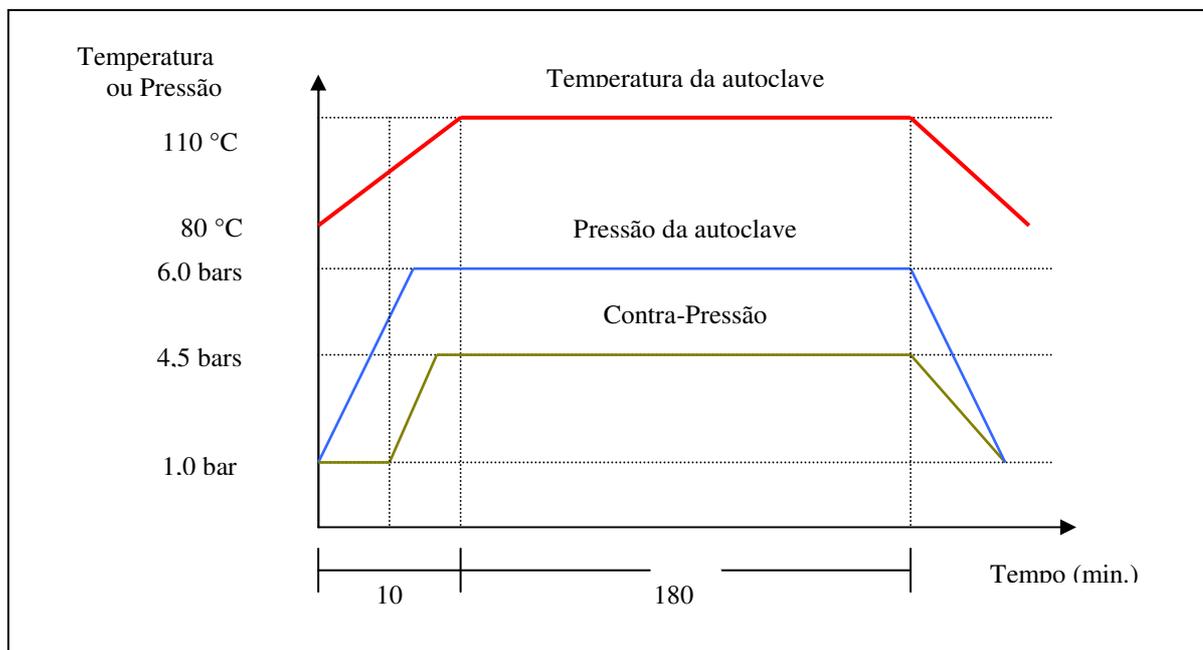
A compreensão da natureza e da construção de um pneu, assim como o conhecimento de seus diferentes componentes, se faz necessária para abordar toda esta discussão concernente à reutilização e à reciclagem de pneus.

O pneu é uma cinta de borracha, deformável e elástica, que é fixada na roda de certos veículos e que protege o conjunto montado, oferecendo a possibilidade de movimentação, com segurança e conforto aos usuários destes veículos. O pneu é composto de borracha, aço e produtos químicos. Existem as chamadas borrachas saturadas (onde somente aparecem duplas ligações, em suas cadeias, a cada 120 carbonos), como por exemplo Butileno, e as borrachas insaturadas (que têm duplas ligações em suas cadeias, a cada 4 carbonos, por exemplo) como o PBR - Polibutadieno. Todavia, a borracha necessita ser vulcanizada, para poder oferecer as características imperativas ao pneu durante sua rodagem.

Uma vulcanização se baseia no trinômio: Temperatura, Pressão e Tempo, conforme mostra a Figura 3.

A *temperatura* permite que as reações de reticulações, ou seja, a vulcanização possa a vir ocorrer, através das pontes de enxofre (agente vulcanizante) e a cadeia molecular dos elastômeros. A subida é lenta, iniciando de um valor de 80°C e atingindo o valor da vulcanização, que é de 110°C, e ali se estabilizando durante todo o processo, que pode durar até 180 minutos. A *pressão* permite a junção das interfaces, a eliminação de bolhas de ar e por conseguinte a moldagem. Existem duas pressões, a de autoclave e a contra-pressão. A pressão de autoclave é a pressão exercida do exterior para o interior da carcaça. A contra-pressão é a pressão exercida do interior para o exterior da carcaça, equilibrando as pressões sobre a carcaça, evitando possíveis deformações. A contra pressão é fornecida por uma espécie de câmara de ar, que é colocada no interior da carcaça. Estas pressões sobem quase que simultaneamente, permanecendo em seus valores estabelecidos durante todo o processo. Os valores atingidos são de 6,0 e 4,5 bars, respectivamente para a pressão de autoclave e a contra-pressão. O *tempo* se faz necessário para que os efeitos de temperatura e pressão cheguem a um valor ideal de eficácia. Observa-se que no gráfico existe um tempo inicial de 10 minutos, onde os parâmetros de temperatura e pressões estão saindo de um ponto inicial para os valores estabelecidos. Nesta etapa, ocorre a acomodação da borracha crua sobre a

borracha vulcanizada, acomodação esta que deve ser lenta para evitar imperfeições de moldagem.



**Figura 3 - Gráfico Temperatura x Pressão x Tempo de uma reforma de pneus**  
**Fonte – Michelin (2001)**

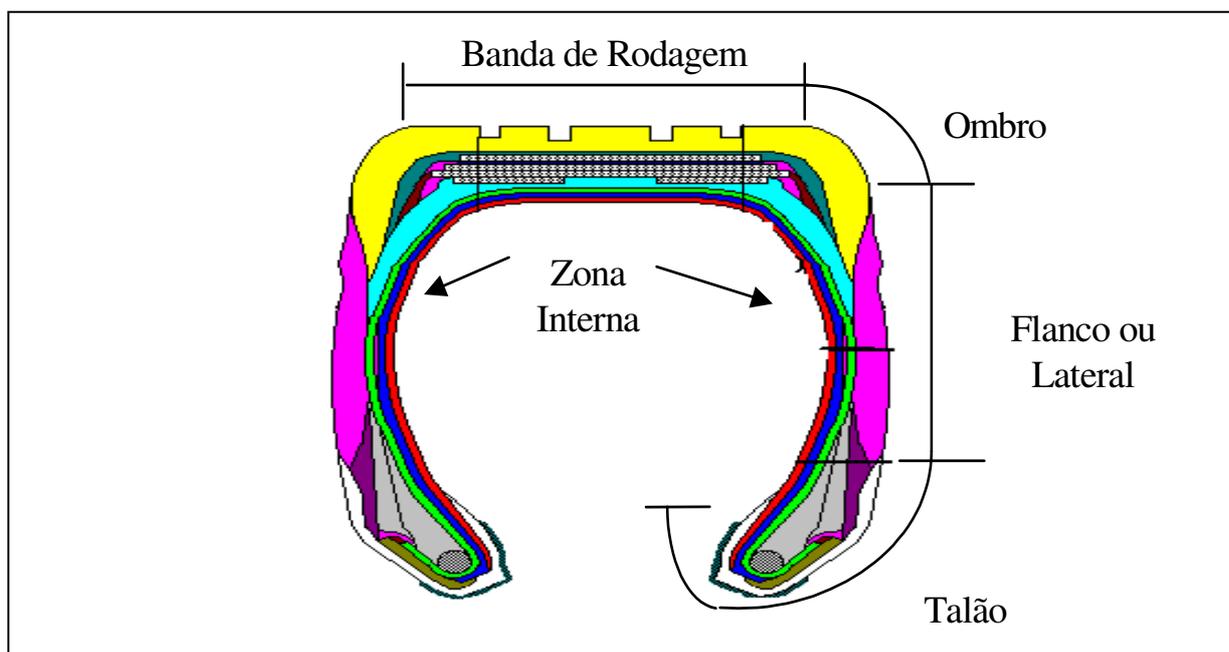
O pneu é o único contato do veículo com o solo e suas funções são diversas e bem definidas. A primeira função de um pneu é de carregar sua carga, ou seja, ele deve suportar toda a carga considerada a ser transportada. Ele deve também transmitir todo o esforço de movimento e frenagem do veículo. Outra função importante é de proporcionar uma dirigibilidade perfeita e suave, garantindo com isso a segurança do veículo. Por fim, uma função relacionada com o conforto do usuário é de absorver choques e golpes devidos a acelerações ou frenagens bruscas ou às irregularidades das estradas.

Para satisfazer estas múltiplas funções, o pneu deve ter algumas características. É fundamental que o pneu tenha uma *resistência à carga*, carga esta determinada para cada dimensão de pneu; uma alta resistência à tração, a fim de evitar desgaste excessivo nas arrancadas; um *bom coeficiente de atrito* com o solo, garantindo assim uma boa aderência e com isso uma melhor segurança na rodagem; uma certa *elasticidade*, para garantir uma vida mais longa da carcaça; uma boa *resistência ao desgaste*, a fim de aumentar a vida útil do pneu, principalmente na primeira vida; boa *resistência aos impactos*, visto que os pneus sofrem muito com os meio-fios das calçadas e buracos nas ruas e estradas; um *bom poder de absorção das vibrações*, para que possa proporcionar maior conforto ao usuário; uma *resistência à pressão* a fim de suportar as calibragens exigidas durante a rodagem; uma *boa*

*resistência à fadiga*, garantindo possibilidades de uma ou mais reformas da carcaça; e por fim uma *boa dirigibilidade*, proporcionando uma segurança do veículo e seu usuário.

A figura 4 representa o corte transversal de um pneu e suas regiões mais importantes: banda de rodagem, ombro, flanco ou lateral, talão e a zona interna.

A **banda de rodagem** é a região do pneu que faz o contato do veículo com o solo. Ela deve fornecer segurança, além de conforto, e deve permitir um compromisso entre a boa aderência e a baixa resistência ao rolamento. O **ombro** de um pneu é a região onde se faz a ligação da banda de rodagem, que é rígida, com o flanco do pneu que deve ser extremamente flexível. O **flanco** é a região do pneu que deve suportar toda a carga e as constantes flexões mecânicas. Deve resistir às agressões externas e climáticas, porque esta região é a mais crítica nas análises para reforma de um pneu. O **talão** tem como finalidade fixar o pneu na roda, além de garantir a estanqueidade, principalmente nos pneus a base de arames de aço, e de assegurar a transmissão dos esforços de aceleração e frenagem. A zona interna tem como função garantir a estanqueidade do pneu sem câmara, e acomodar a câmara de ar, nos pneus com câmaras.



**Figura 4** – Corte transversal de um Pneu Radial  
**Fonte** – Michelin (2001)

Nota-se que em seu interior, este mesmo corte transversal possui zonas distintas, que se encontram coloridas. Estas zonas, na verdade são denominados produtos, semi-acabados de borracha e aço, que são sobrepostos, uns sobre os outros durante a montagem do pneu, antes da vulcanização. Após a vulcanização, estes produtos se aderem,

formando um só produto que é o pneu. Pode-se citar alguns produtos mais importantes como a banda de rodagem (amarelo), o flanco externo (magenta), o protetor do talão (branco), a napa carcaça (verde claro), a goma interna (vermelho), o aro (redondo) e as napas de trabalho e proteção (tracejado).

Além de todas as funções e características descritas anteriormente, um pneu deve ser ainda econômico, confortável, silencioso e por fim estético. Os pneus podem ser fabricados por dois métodos diferentes: o método convencional e o método radial.

O *Método Convencional* foi desenvolvido no fim do século XIX. Ele consiste na sobreposição de lonas, normalmente têxteis, dispostas diagonalmente, formando um ângulo de 45°. São os chamados Pneus Diagonais. Apesar do custo mais baixo, praticamente não se fabrica mais pneus com este método pois, o mesmo é muito rígido, com pouca estabilidade, característica exigida cada vez mais pelos usuários. Também apresenta aquecimento importante durante a rodagem, maior possibilidade de furos, maior consumo de combustível e por conseqüência, maior emissão de poluentes. Este método foi substituído pelo Método Radial.

O *Método Radial* foi desenvolvido pela Michelin em 1948. Este método é mais moderno e eficaz, apesar de não alterar significativamente a natureza do produto. Atualmente todos os fabricantes produzem pneus radiais. Os cabos da napa carcaça são orientados radialmente em relação ao centro do pneu, fazendo ângulo de 90°, em torno do aro. É cinturada no topo por várias napas de aço cruzadas, formando triangulações. Esta estrutura confere ao pneu algumas vantagens importantes. A primeira das vantagens é a *segurança*, pois este método melhora a dirigibilidade, com melhor obediência às manobras; melhora também a estabilidade de rodagem, com menor derivação do trajeto; otimiza a aderência ao solo, com muito menos derrapagens, e diminui o aquecimento do pneu, reduzindo assim a degradação da borracha. Outra vantagem importante deste método é o *conforto* proporcionado por este tipo de pneu. Com uma maior elasticidade, este pneu permite manobras mais suaves e uma melhor absorção dos impactos durante a rodagem. A *economia* é a terceira vantagem dos pneus radiais em relação aos diagonais, pois eles permitem mais reformas, principalmente em pneus de ônibus e caminhões; têm o preço relativo menor por quilômetro rodado, chegando a rodar 2 ou 3 vezes mais e ainda proporcionam uma economia de combustível de 6 a 12%, em relação aos pneus diagonais.

Os produtos utilizados para a construção de um pneu são de baixíssima degradabilidade. O princípio de vulcanização de um pneu é praticamente irreversível, pois ele altera a natureza das ligações químicas dos componentes. O enxofre, comumente utilizado

como agente vulcanizante, forma com os carbonos existentes nas estruturas das borrachas as pontes de enxofre, ligações químicas bastante rígidas e conseqüentemente muito estáveis.

Desta maneira, torna-se quase impossível “devulcanizar” para retornar à natureza das ligações químicas de origem. O que se consegue, às vezes, é um produto regenerado, com características próximas ao do composto original.

A composição química de um pneu radial varia pouco e depende do tipo de pneu. Na média, pode-se dizer que 50% da composição de um pneu é borracha e que os outros 50% podem ser distribuídos da seguinte maneira: 25% de negro de carbono, 20% de aço e 5% de produtos químicos diversos.

A tabela 2 apresenta os resultados analíticos de constituintes químicos (metais) analisados em amostra de borracha de pneu. Nota-se uma vasta quantidade de metais que fazem parte da composição da borracha, porém em pequenas quantidades. A exceção fica com o zinco que, com aproximadamente 16.000 ppm, tem a função de ativador de vulcanização, necessitando, portanto, de maiores concentrações na composição.

**Tabela 2 - Resultado analítico em Borracha de Pneu**

<b>Constituintes</b>	<b>Borracha de Pneu (ppm)</b>
Cd	< 20
Hg	< 1
Tl	< 30
As	< 50
Co	< 10
Ni	< 10
Se	< 90
Te	< 30
Cr	< 5
Pb	< 30
Sb	< 40
Sn	125
V	< 10
Zn	16000

**Fonte** – Holcin (1998)

O enxofre, agente vulcanizante, normalmente apresenta na borracha de pneu concentrações bem próximas de 10.000 ppm. O poder calorífico da borracha é de aproximadamente 9.338 kcal/kg.

A tabela 3 apresenta a porcentagem de aço por categoria do pneu, conforme informações de fabricante de pneus. Observa-se que a categoria radial contém um percentual

significativamente maior de aço do que o diagonal. Isto ocorre porque os pneus diagonais são fabricados utilizando materiais reforçantes na estrutura, em sua maioria têxteis. Já os pneus radiais são fabricados com reforços estruturais em aço.

**Tabela 3 – Porcentagem de aço por categoria de pneu**

<b>Categoria de Pneu</b>	<b>Tipo</b>	<b>% Aço</b>
<b>Diagonal</b>	Carga	5,99
	Camionete	4,00
	Passeio	3,00
<b>Radial</b>	Carga	32,80
	Camionete	14,85
	Passeio	16,32

**Fonte – Michelin (2001)**

Quanto maior o percentual de aço presente no pneu, menor será o percentual de borracha e, portanto menor será o seu poder calorífico. O poder calorífico do pneu radial, para dois tipos diferentes, será:

- pneu tipo passeio tem 16,32% de aço  $\Rightarrow$  PCI = 7.814 kcal/kg

- pneu tipo carga tem 32,8% de aço  $\Rightarrow$  PCI = 6.275 kcal/kg

A tabela 4 apresenta a composição química dos aços utilizados na fabricação de pneus, Aço 1070 e Aço 1080, fornecidos pela Empresa Belgo Mineira. Observa-se primeiramente que os aços são muito semelhantes quimicamente, e que em ambos, os metais mais expressivos na composição são o níquel, cromo, chumbo e estanho. O zinco, que apresenta concentração importante na borracha, aparece, contudo, com valores inexpressivos no aço. Os valores apresentados são de análises realizadas em amostras dos materiais.

**Tabela 4** - Composição química do aço utilizado na fabricação de pneus

Parâmetros	Aço 1070 (ppm)	Aço 1080 (ppm)
Cd	< 10	< 10
Hg	nd	nd
Tl	nd	nd
As	nd	nd
Co	50	50
Ni	180	160
Se	nd	nd
Te	nd	nd
Cr	160	110
Pb	260	230
Sb	< 10	< 10
Sn	< 120	< 120
V	< 40	< 40
Zn	< 50	< 50

Fonte – Holcin (1998)

Nota: nd = não detectado

Com as informações das tabelas 1 e 3, calcula-se a composição típica para os pneus radiais tipo passeio e tipo carga, ou seja, 16,32% e 32,8% de aço na borracha, respectivamente. É importante destacar que o zinco, apesar de sua concentração inexpressiva no aço, permanece com concentrações elevadíssimas nos dois tipos de pneus radiais. Os resultados são apresentados na tabela 5.

**Tabela 5**– Composição típica do pneu radial

Parâmetros	Valores em ppm	
	Tipo Passeio	Tipo Carga
Cd	< 18	< 17
Hg	< 1	< 1
Tl	< 25	< 20
As	< 42	< 34
Co	< 17	< 23
Ni	< 38	< 66
Se	< 75	< 60
Te	< 25	< 20
Cr	< 30	< 56
Pb	< 68	< 105
Sb	< 35	< 30
Sn	< 124	< 123
V	< 15	< 20
Zn	< 13.397	< 10.768

Existe uma relação muito importante entre o peso de um pneu e o volume ocupado pelo mesmo. Em função da existência de um espaço vazio importante no centro do

pneu, espaço este que só tem utilidade quando montado em uma roda qualquer, este produto se torna muito volumoso. Esta é uma das principais razões pela qual se encontra dificuldade para recolher pneus inservíveis, e, por conseguinte, de se encontrar uma destinação adequada aos mesmos.

Na tabela 6 podem-se ver resumidamente os pesos médios de pneus para as diversas categorias de veículos, bem como a quantidade de pneus que ocupa 1 metro cúbico de cada tipo de pneu. Já existem pneus para a engenharia civil que pesam em torno de 4000kg e que têm mais de 3 metros de diâmetro.

Uma observação importante é que, quando picado, o pneu passa ocupar bem menos volume do que inteiro, visto que se elimina o espaço vazio em seu centro. Assim, 1 m<sup>3</sup> é ocupado por aproximadamente 600 Kg de pneus picados.

**Tabela 6 - Peso Médio de Pneus x Quantidade de pneus em 1 m<sup>3</sup>**

<b>CATEGORIA</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Quantidade em 1 m<sup>3</sup></b>
Passeio	8,0	22
Caminhonete	13,0	10
Ônibus/Caminhão	60,0	3
Agrícola	100,0	1
Engenharia Civil	> 100,0	< 1

**Fonte – Masdouquier (1994)**

Como já foi descrito anteriormente, o pneu é um produto vulcanizado, ou seja, ele é submetido a uma temperatura por um tempo, numa determinada pressão, o que garante também a sua moldagem. Por conta disso, o pneu é um produto que é fabricado para durar um determinado tempo, resistindo, de maneira mais adequada, ao desgaste de rodagem. Atualmente, os fabricantes de pneus buscam atender aos seus consumidores, que procuram produtos a preços aceitáveis, com boas performances, mas que duram cada vez mais.

Por conta disso, o tempo médio de vida de utilização de um pneu é muito longo, e varia de acordo com o tipo e a utilização do mesmo, mas que faz parte do projeto de concepção do pneu. Um pneu de passeio pode rodar entre 40.000 e 50.000 km, enquanto um pneu de camionete pode chegar a rodar entre 60.000 e 70.000 km. Já os pneus de carga, que equipam os ônibus e caminhões podem atingir marcas ainda muitas maiores, chegando, às vezes, a rodar cerca 180.000 ou até 200.000 km. Após esta quilometragem, o pneu começa a aparentar sinais de desgaste e é neste ponto, que uma análise cuidadosa deve ser realizada,

até por técnicos especializados, para definir o que será realizado com o pneu, que neste ponto tornou-se um pneu inservível.

Atualmente podem-se classificar os pneus inservíveis em 2 categorias: reformáveis ou não reformáveis. Os reformáveis podem ser reutilizados como pneus após uma reforma; os pneus inservíveis não reformáveis (que não aceitam reformas) devem ter destino diferente daquele que não a reutilização como pneu.

Aos pneus inservíveis reformáveis, se aplica uma técnica que consiste em substituir a banda de rodagem e eventualmente a napa de proteção, com ou sem a reparação da carcaça. Estes pneus são, em seguida, revendidos dentro de um mercado de reformados a um preço em torno de 40% inferior a dos pneus novos. O mercado de pneus reformados não é igual para todas as famílias de pneus, sendo que 60% de todos os pneus reformados são aqueles utilizados em ônibus e caminhões. O restante fica distribuído entre os pneus para camionetes (30%) e para automóveis (10%).

Uma observação importante é que nem todos os pneus podem ser reformados. A seleção é muito severa, pois existem alguns critérios de qualidade (definição dos defeitos com suas tolerâncias para a classificação) que não são admissíveis para a reforma, como por exemplo, rasgos nas laterais causados por batidas em meio-fio.

## CAPÍTULO 4

### ALTERNATIVAS PARA GERENCIAMENTO DOS PNEUS INSERVÍVEIS

Há vários anos se assiste a mudança de mentalidade no que concerne aos pneus usados. Até a metade da década de 70, ninguém se preocupava verdadeiramente em saber onde um pneu, já sem utilidade, era depositado. Com a queda dos preços do petróleo e por conseqüência, dos preços da borracha sintética (produto oriundo do petróleo), começaram a ocorrer reflexões neste sentido, mas ainda muito lentas, pois até os fabricantes não tinham ainda tentado utilizar componente reciclado da borracha. Nesta época, quase a totalidade dos pneus era jogada fora, no final de seu uso, sendo que apenas 15 % eram recauchutados.

Atualmente o ciclo de um pneu usado deve compreender 2 fases chaves: a coleta e a valorização.

Entende-se por valorização, retirar o pneu de seu circuito tradicional, ou seja, evitar que o mesmo se torne um produto inservível, do ponto de vista “pneu”, redirecionando-o para outros fins, onde o mesmo possa ser reaproveitado, em parte ou totalmente em uma outra cadeia produtiva.

A valorização de um pneu inservível pode ocorrer de formas diferentes e obedecer perfeitamente o conceito dos 4 R's, ou seja: *Redução*, *Reutilização*, *Reciclagem* e *Recuperação energética*. A seguir, estas diferentes formas são mostradas associadas ao “R” correspondente.

- Redução:

O pneu é valorizado, tornando-se um produto com um tempo de vida cada vez maior, onde naturalmente ocorre uma redução da freqüência de reposição por um outro pneu novo. Assim, ou se produz um pneu muito resistente ao desgaste, ou se produz um pneu que suporte uma ou várias reformas. Com estas opções, há certamente uma redução da necessidade de reposição, e com isso, uma valorização do pneu.

- Reutilização:

Esta técnica consiste em valorizar o pneu inservível utilizando-o para outros fins, os quais serão discutidos posteriormente, diferentes de sua função normal, sem uma transformação importante em suas características iniciais.

Entende-se que desta forma, os pneus inservíveis, que seriam descartados no meio ambiente, podem continuar sendo utilizados em funções diferentes e, portanto reutilizados para outros fins.

- Reciclagem:

Os pneus inservíveis podem ainda ser reciclados de 2 modos diferentes como matéria-prima: como borracha simplesmente triturada, que pode ser utilizada em diversas aplicações ou ainda como borracha regenerada, onde se busca conseguir propriedades similares à da borracha virgem.

- Recuperação energética:

Em função de seu alto poder calorífico, os pneus inservíveis podem ser utilizados na queima, em substituição a alguns combustíveis, como por exemplo, o carvão, sendo necessário, neste caso, controles rigorosos da qualidade do ar durante esta queima.

Todas estas formas consistem em agregar um valor comercial ao pneu, fazendo com que o reaproveitamento do mesmo passe a ser viável economicamente, na cadeia produtiva.

Recentemente, foi divulgada a situação da geração de pneus inservíveis no Brasil, ficando em torno de 280 mil toneladas de pneus por ano (Michelin, 2000). O reaproveitamento se apresenta como a solução mais interessante sob o ponto de vista ambiental, além de possuir algumas vantagens sob o ponto de vista econômico. É importante ressaltar a situação que hoje presenciamos: menos de 1/5 dos pneus usados são reaproveitados no Brasil, sendo o restante jogado de maneira prejudicial no meio ambiente (Michelin, 2000). Quando se fala em valorização do pneu usado, começam a surgir diversos e complicados problemas, como a dificuldade de coleta e a posterior dificuldade de comercialização dos produtos da valorização.

No entanto, as alternativas de valorização de um pneu inservível têm crescido no mundo, e o Brasil acompanha de perto estas evoluções.

#### 4.1. REDUÇÃO

Consiste em reduzir a quantidade total de pneu, existente sobre a superfície terrestre. Esta é a mais importante de todas as valorizações para o pneu.

Primeiramente, os fabricantes de pneus buscam cada vez mais processar *borrachas mais resistentes* à rodagem, aumentando com isso a quilometragem do pneu,

ocasionando aumento da vida útil do mesmo. Uma outra alternativa é a *reforma* do pneu, onde a banda de rodagem de um pneu, ao perder os sulcos, responsáveis pela aderência ao solo e a segurança, é substituída por uma banda de rodagem nova, tornando-o novamente apropriado a exercer sua função. Há ainda uma alternativa recente, onde os fabricantes começaram a produzir pneus com capacidades de cargas maiores, ou seja, um pneu pode substituir 2 pneus geminados nos eixos traseiros de ônibus e caminhões, sem qualquer comprometimento de performance. O que caracteriza a redução, neste caso, é que este pneu tem aproximadamente 70 % do peso da soma dos 2 pneus substituídos (Michelin, 2000).

#### 4.1.1. Aumento da vida útil

Com a concorrência mais acirrada e a questão ambiental cada vez mais latente no contexto mundial, os fabricantes de pneus estão em uma guerra aberta e muito saudável para o meio ambiente.

A cada ano, a cada modelo que é lançado no mercado, os fabricantes anunciam uma vida útil de rodagem cada vez maior para os pneus. É como se toda a tecnologia de segurança, conforto e estética tivesse sido colocada a um segundo plano, com ênfase para a questão ambiental. Atualmente, o grande marketing de uma marca é aquele onde diz que tal pneu “dura muito mais”. Já existem pneus de automóveis sendo anunciado com vida útil de 80.000 km, o que não deixa de ser uma conquista importante, principalmente se considerarmos que as estradas nacionais não favorecem esta situação. As nossas estradas são as maiores responsáveis pelo desgaste de nossos pneus, visto que um pneu necessita de uma aderência integral ao solo por onde ele rola, e qualquer variação neste contato, dá início a um desgaste irregular, que no começo é mínimo e que rapidamente se transformará em um desgaste importante. Trata-se do fenômeno “lixa”, onde a não aderência perfeita do pneu, em certas regiões, com o solo provoca não um contato e sim um “lixamento” da região, que se desgastará muito mais rapidamente.

Como as estradas nacionais são muito irregulares, ou seja, com muitas imperfeições em sua camada asfáltica, algumas condutas dos usuários tornam-se extremamente importantes, e devem ser realizadas sistematicamente, como por exemplo, o balanceamento, o alinhamento, a calibragem e uma escolha correta do pneu, em função do tipo de estrada, da velocidade, e do tipo do automóvel.

Certamente, com todas estas medidas, pode-se estar contribuindo para o aumento da vida útil do pneu e, por conseguinte, estar também contribuindo para a melhoria do meio ambiente.

#### 4.1.2. Pneus Reformados

Entende-se por valorização como pneu reformado o fato de um pneu ter a sua vida média prolongada, através de uma ou várias reformas.

O objetivo desta valorização é de aumentar a vida útil da carcaça proporcionando um melhor custo por quilômetro rodado, e conseqüentemente reduzindo o impacto ambiental causado pela disposição inadequada deste resíduo no meio ambiente. Qualquer recauchutadora pode reformar um pneu, porém o cenário está mudando. A Michelin, fabricante de pneus, montou uma estrutura de licenciados por toda a América do Sul, que faz reformas de pneus de carga, com garantia contra qualquer defeito na reforma e com uma garantia maior quando os pneus são da própria Michelin.

Para se ter uma idéia desta questão no mundo, nos Estados Unidos são reformados anualmente 15 milhões de pneus, e o Brasil, com o segundo lugar, reforma por ano, cerca de 8 milhões de pneus (Michelin, 2001). Isto se deve fundamentalmente a uma predominância de transporte rodoviário nestes países.

Existem três processos diferentes em que um pneu inservível pode ser reformado, conseguindo após esta reforma uma valorização, readquirindo condições para ser utilizado normalmente, em rodagem. São eles: *Recapagem*, *Recauchutagem* e *Remoldagem*.

*Recapagem* é o processo pelo qual um pneu é reformado pela substituição da sua banda de rodagem. *Recauchutagem* é o processo pelo qual um pneu é reformado pela substituição da sua banda de rodagem e dos seus ombros. *Remoldagem* é o processo pelo qual um pneu é reformado pela substituição da sua banda de rodagem, de seus ombros e de toda superfície dos seus flancos. Este último processo também é conhecido como recauchutagem de talão a talão. Estes três processos estão definidos na norma NBR NM 225, 2000, que trata da regulamentação de reformas de pneus na América Latina, definindo os critérios mínimos de seleção para reforma e reparação de pneus. Na tabela 7, foi realizado um resumo destas definições, correlacionando os três tipos de processo de reforma com a possibilidade de substituições de zonas dos pneus.

**Tabela 7 - Distinção dos Processos de reforma de pneus inservíveis**

<b>PROCESSOS DE REFORMA</b>	<b>ZONAS SUBSTITUÍDAS</b>		
	<b>Banda de Rodagem</b>	<b>Ombros</b>	<b>Flancos</b>
Recapagem	SIM	NÃO	NÃO
Recauchutagem	SIM	SIM	NÃO
Remoldagem	SIM	SIM	SIM

**Fonte - NBR NM 225 (2000)**

Todos estes processos são realizados através da substituição de uma ou mais regiões do pneu. Estas regiões, vulcanizadas quando da fabricação do pneu, e que se desgastam durante o uso, são substituídas por borracha crua, e que necessita ser submetida a uma nova vulcanização, para readquirir as propriedades de um pneu novo.

A vulcanização se baseia no trinômio temperatura, pressão e tempo, conforme descrito no capítulo 3. Todo este processo é acompanhado por uma criteriosa avaliação da carcaça a ser reformada, que decidirá o destino da carcaça, ou seja, se ela pode ser reformada ou se será necessária uma outra destinação para ela, o que quase sempre não é ambientalmente correto. Estes critérios estão documentados de forma integral na norma NBR NM 225/2000.

Os critérios que desqualificam o pneu para a possibilidade de reforma são rígidos e diferenciados para os tipos de pneus. Para pneus de passeio, existem dois critérios que são específicos; o primeiro estabelece que um pneu de passeio só pode ser reformado uma única vez e o segundo diz respeito à idade do pneu, que não pode ser superior a 5 anos, a contar da data de fabricação.

Os outros critérios são comuns aos 3 tipos de pneus relacionados na norma: passeio, camionete e carga. São critérios que desqualificam um pneu para a reforma:

- contaminação por derivados de petróleo;
- danos e avarias superiores aos limites estabelecidos na tabela 8;
- separação entre lonas (napas) ou dobras e ondulações;
- separação do revestimento interno ou abertura de emendas;
- lonas expostas por desgaste excessivo;
- rachaduras e deformações permanentes;
- ebonitização (quebradiço por baquelização) dos elastômeros na área do talão;
- danos na área dos talões atingindo napas ou aros.

É importante definir que número de consertos é diferente de número de reformas. Em uma reforma é possível realizar vários consertos, conforme é mostrado na

tabela 8. Ela mostra a relação entre o número máximo de consertos permitidos em relação ao diâmetro máximo da avaria para cada tipo de pneu. Nota-se que os consertos em pneus de passeio é bem mais restrito que nos pneus de carga, principalmente os que são projetados para altas velocidades.

**Tabela 8** - Nº consertos x Diâmetro máximo de avaria relacionados ao tipo de pneu

<b>Tipo de pneu</b>	<b>Nº de consertos</b>	<b>Diâmetro máximo da avaria (mm)</b>
Diagonal para automóveis	3	6
Radial para automóveis (código velocidade $\leq$ 190 km/h)	2	6
Radial para automóveis (código velocidade $>$ 190 km/h)	1	6
Diagonal e Radial para camionetes	4	8
Diagonal e Radial para ônibus e caminhões	6	8

**Fonte** - NM 225 (2000)

Na tabela 9 são mostradas as dimensões de reparações medidas pelo lado interno do pneu, porém levando-se em consideração as regiões os diversos tipos de pneus. Observa-se que nas regiões do ombro e do talão, existem tolerâncias de áreas específicas que não são reparáveis, definidas por uma cota mostrada na tabela. Já nas regiões da banda de rodagem e flanco, não existe esta área não reparável, porém é estabelecido o tamanho máximo do reparo. Esta tabela vem demonstrar a importância da avaliação prévia dos pneus antes de sua reforma, os quais obedecem uma rigorosa inspeção em toda a sua área, quer externa, quer interna. E vem ratificar a importância do usuário na observação contínua do aspecto do pneu, adicionado à prática de uma conduta pró-ativa em relação a alguns itens importantes relacionados aos pneus, como por exemplo, calibragem, alinhamento, balanceamento, cambagem e rodízio dos mesmos.

**Tabela 9** – Dimensões de reparações medidas pelo lado interno do pneu

	Área do Pneu	Talões	Flancos	Ombros	Banda de rodagem
Tipos de Pneus		Área não reparável (mm)	Tamanho máximo do dano (mm)	Área não reparável (mm)	Tamanho máximo do dano (mm)
D I A G O N A L	Automóveis	NP	NP	NP	10
	Camionetes	60	20	20	30
	Caminhões e ônibus < 900-20 (*)	80	50	30	50
	Caminhões e ônibus ≥ 900-20	90	70	30	70
R A D I A L	Automóveis	NP	NP	NP	10
	Camionetes	65	(**)	15	30
	Caminhões e ônibus com altura de seção ≤ 230 mm	65	(**)	20	30
	Caminhões e ônibus com altura de seção > 230 mm	70	(**)	30	35

**Fonte** - NM 225 (2000) NP – não permitido -

(\*) - Dimensão de pneus

(\*\*) - Depende da altura e largura da avaria

## 4.2. REUTILIZAÇÃO

Consiste em utilizar o pneu, inteiro ou cortado em pedaços, para a fabricação de diferentes produtos de borracha. Neste conceito não há transformação importante do pneu, ou seja, o mesmo quase que mantém suas características iniciais inalteradas.

Algumas formas que têm sido utilizadas na reutilização de pneus estão descritas a seguir.

### 4.2.1. Pneu-Solo

Uma das primeiras utilizações de pneus inservíveis na prática da Engenharia Civil ocorreu na década de 70, quando da reconstrução de um aterro reforçado com pneus em uma rodovia ao norte da Califórnia (Hausmann, 1990). As camadas horizontais de pneus eram espaçadas verticalmente de 0,60 m e interligadas com alças de metal. Os estudos relacionados

à utilização de pneus e solo (denominada “*pneusol*” ou solo-pneus) foram desenvolvidos na França, com a construção de um muro experimental em Langres (Long, 1984). A construção deste muro, que tinha 5 metros de altura por 10 metros de extensão, demonstrou a viabilidade de execução de estruturas a partir do lançamento de camadas de pneus preenchidos com solo.

É a técnica mais comumente utilizada dentro do domínio da valorização do pneu em estado. O interessante deste processo é de exigir um mínimo de transformação na preparação do pneu, utilizando, ao máximo, a resistência dos diferentes constituintes, visto que os pneus são constituídos de borracha, reforçados com fibras têxteis ou metálicas, atribuindo-lhes elevada resistência a tensões radiais. Estas propriedades mecânicas permanecem nos pneus mesmo após sua vida útil como elemento de rodagem.

Esta técnica consiste em reagrupar os pneus de maneira linear, a fim de suportar esforços importantes de tração. Dentro de uma obra, o pneu-solo é arrumado em camadas horizontais, intercalados em relação à fileira seguinte, fazendo assim, uma arrumação estável, permitindo que haja uma parte frontal, onde esteticamente se possam plantar mudas de árvores, caso necessite. Existem duas maneiras de preparação de um pneu-solo. O conjunto pode ser preparado com pneus inteiros ou ainda com pneus cortados, ou seja, com a retirada de um de seus flancos (laterais). A vantagem de utilização do pneu cortado é que, após a aplicação da sobrecarga, se observa uma redução de 30% nos deslocamentos horizontais, em relação aos pneus inteiros (Gerscovich, 2000). Uma outra vantagem é que a remoção do flanco acelera o processo de construção do conjunto, devido a maior facilidade de amarração e preenchimento dos pneus. A desvantagem em se utilizar os pneus cortados é que se faz necessário a aquisição de equipamento específico para a remoção do flanco do pneu, principalmente no caso dos pneus radiais, os quais são reforçados com aço (Gerscovich, 2000).

Outro aspecto importante é o material utilizado para a amarração dos pneus, durante a construção do conjunto. Quando a amarração é realizada com arame metálico existe um pequeno aumento da rigidez do muro de solo-pneus. Entretanto, a escolha do material de amarração deve ainda contemplar o custo do mesmo e a sua facilidade de execução. A amarração com arame é facilitada com a utilização de um alicate comum, enquanto que a amarração com corda é um pouco mais trabalhosa e demorada, requerendo uma execução artesanal, com um nó especial, que seja resistente ao processo construtivo. A quantidade necessária de corda também é muito maior, cerca de 100% a mais do que de arame, em função da necessidade de realização de nó e de número de voltas necessárias.

Ambos os métodos de amarração são adequados para evitar deslocamentos laterais excessivos, entretanto, como o custo da corda é aproximadamente 5 vezes menor que

o custo do arame, pode-se concluir que a amarração com a corda de polipropileno se apresenta como a alternativa mais viável economicamente (Gerscovich, 2000).

A principal qualidade do pneu-solo é que ele permite uma melhor repartição dos esforços, dentro da massa do solo reforçado e sobre as fundações. Graças a isto, o pneu-solo é um excelente material para a engenharia civil, pois ele permite a construção de muros de sustentação, proteção de encostas e reforços de encostas.

A principal vantagem desta técnica é que quase nenhuma transformação do pneu se faz necessária para a sua reutilização. Outras vantagens como o aumento da resistência do solo, a redução da vibração e finalmente a nenhuma ou quase nenhuma degradação com o tempo, faz desta técnica uma alternativa promissora de reutilização de pneus inservíveis.

A figura 5 mostra os pneus deitados, arrumados uns sobre os outros e intercalados, sendo utilizados de maneira correta na contenção de uma encosta, na cidade do Rio de Janeiro (Gerscovich, 2000). Ver detalhes na figura 6.



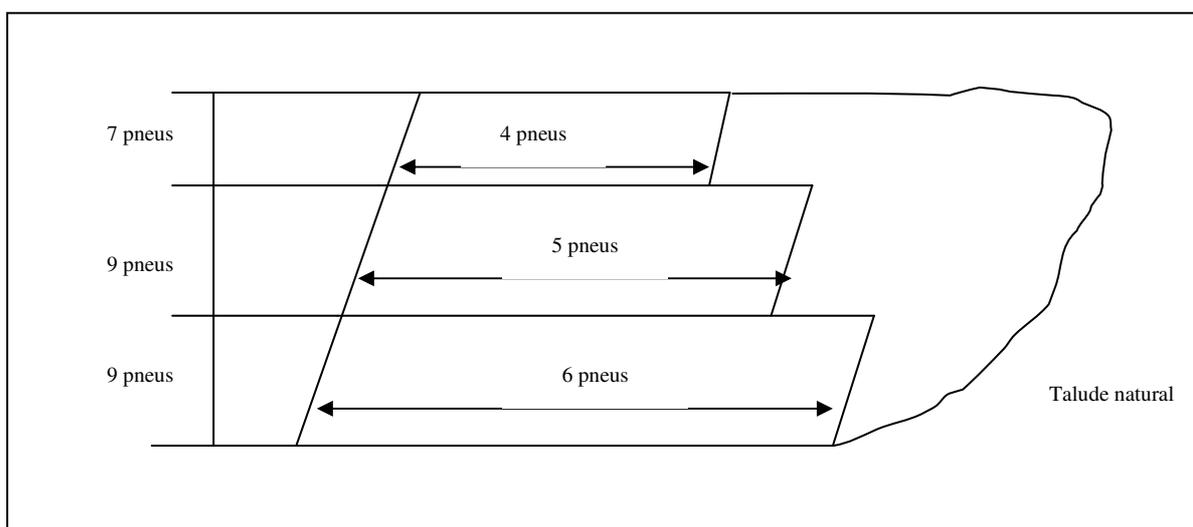
**Figura 5** - Exemplo de utilização na contenção de encostas  
**Fonte** – Gerscovich (2000)



**Figura 6** – Detalhes de pneus utilizados em encostas  
**Fonte** – Michelin (2000)

Como foi mostrado, o processo do pneu-solo tem aplicações múltiplas e variadas. Os testes provaram que é um bom material, mas aparentemente a utilização seria ainda marginal em razão de concorrência de outros materiais, como, por exemplo mantas de polietileno, ou ainda grades de arames de aço entrelaçados.

Para se avaliar a quantidade de pneus inservíveis utilizadas nesta alternativa, pode-se exemplificar a construção de um muro de estabilização de encostas que contenha 60 metros de extensão por 4 metros de altura, apresentado na figura 5 (Gerscovich, 2000). O arranjo necessário para que estes pneus devam ter para uma boa estabilidade é mostrado, esquematicamente, na figura 7. A camada inferior deve conter 6 pneus de profundidade por 9 pneus de altura, a camada intermediária com 5 pneus de profundidade por 9 pneus de altura, e na camada superior com 4 pneus de profundidade por 7 pneus de altura.



**Figura 7** – Arrumação de pneus num muro de estabilização de encostas

**Fonte** – Gerscovich (2000)

Considerando que a construção deste muro tenha sido feita com pneus de passeio, cujas dimensões médias são de 0,60 m de diâmetro com 0,16 m de altura, pode-se calcular a quantidade necessária de pneus para 300 m de extensão. Na camada inferior, para cada 0,60 m do muro, são utilizados 54 pneus (9x6), ou seja, 27000 pneus (54x500) em 300 metros. Na camada intermediária 22500 pneus (9x5x500) e na camada superior 14000 pneus (7x4x500). Isto significa que num muro de estabilização de encostas de 4 metros de altura por 300 metros de extensão pode-se consumir aproximadamente 63500 pneus de passeio, o que vem a ser um número considerável, visto ser um exemplo de apenas um muro.

#### 4.2.2. Tapete Pneu

Nos tempos atuais, as vibrações se tornam temores constantes particularmente nos meios urbanos e industriais. Conseqüentemente, estas vibrações acarretam o barulho, verdadeiro incômodo das grandes cidades. As vibrações nascem próximas de máquinas giratórias ou são devidas as circulações ferroviárias ou rodoviárias. Para lutar contra este fenômeno, é necessário acabar com as vibrações em sua fonte ou próximo do lugar a proteger.

O tapete-pneu é um material antivibratório, utilizado na base dos trilhos, de trens e metrô, e os resultados constatados são particularmente encorajadores. Para diminuir as vibrações, o tapete-pneu é composto de uma sola de borracha colocada nos lugares onde a vibração é mais importante.

A técnica consiste em estender duas camadas cruzadas de bandas de rodagens de pneus inservíveis. O corte deve ser retilíneo e as bordas unidas. As bandas devem ser rebitadas uma sobre as outras por um grampo elástico a fim de evitar toda a propagação dos efeitos das vibrações (Masdoumier, 1994).

Também podem ser utilizados em isolamento de fundações de construções e em isolamento de maciços de máquinas giratórias.

#### 4.2.3. Drenagem de Biogás

O lixo doméstico contém matéria orgânica, que, ao fermentar, dá origem ao biogás. Os compostos principais deste biogás são metano e gás carbônico. Toda essa energia é recuperável comercialmente, mas existem desvantagens importantes em relação ao odor e aos riscos de explosão.

De modo a direcionar o gás para uma recuperação é necessária a construção de drenos. A técnica de drenagem horizontal, utilizada unicamente na Europa, consiste em juntar os pneus de ônibus/caminhões que são mais resistentes, um do lado do outro. Este dreno é prolongado por um tubo de polietileno de 90 mm de diâmetro para permitir a ligação à estação de bombeamento. Os pneus são em seguida recobertos por lixo (Masdoumier, 1994).

Podem-se citar vantagens deste sistema de drenagem como a colocação fácil dos pneus por pessoal não especializado, a maior resistência em relação aos drenos clássicos e

um custo de material praticamente nulo, visto que os pneus inservíveis ainda podem ser encontrados nos aterros sanitários.

Entretanto, existem alguns inconvenientes, pois com a umidade do chorume, pode ocorrer fermentação do lixo, e como consequência o rompimento do dreno. Para remediar este problema, o dreno é enrolado dentro de uma rede de proteção (Masdoumier, 1994).

Esta técnica é realizável e permite não só reutilizar um produto indesejável (pneus inservíveis), mas também recuperar o biogás de aterros, dentro de condições tecnô-  
econômicas satisfatórias.

#### 4.2.4. Recifes Artificiais

Esta técnica de modificação física, principalmente do litoral ou de lagos, consiste em instalar no fundo da água ou posicionar próximo às margens, conjuntos sólidos estruturados de pneus inservíveis. Estas imersões se fazem de 10 a 50 metros, onde normalmente se encontra a ausência de fundações rochosas naturais. O objetivo destes recifes não é somente criar pólos de concentrações de fauna marinha, mas, sobretudo de proteger as costas contra a erosão das correntes marinhas. Esta técnica já é desenvolvida no Japão e nos Estados Unidos, a partir de 1960 (Masdoumier, 1994).

Na Inglaterra existem algumas restrições sobre tal reutilização, em função de alguns fatores, que ainda estão sendo analisados. Fatores como a degradação da borracha por raios ultravioletas, principalmente quando os pneus ficam situados em águas rasas e o aumento da possibilidade de abrasão, devido à movimentação das águas, seja pelo movimento das marés, seja por tempestades cada vez mais frequentes ocasionadas pelo aquecimento global, fazem com que os ambientalistas deste país sejam bastante precavidos sobre o assunto (Collins, 2002).

No Brasil, em Angra dos Reis, existem testes em andamento, dos quais ainda não se têm resultados. Uma vez que nossa região costeira é bastante extensa, é importante que se multipliquem tentativas de aplicação desta técnica. O intercâmbio de informações com países e organizações ambientais deve ser incentivado, a fim de viabilizar e ampliar a implementação segura desta técnica no Brasil.

#### 4.2.5. Outras Alternativas

Existem ainda outras alternativas para reaproveitamento do pneu em estado, porém são mais trabalhosas, como o exemplo mostrado na figura 8, onde os pneus primeiramente têm as suas laterais cortadas, e após esta etapa, os mesmos são unidos através de uma amarração e colados, transformando-os em uma tubulação, que pode ser utilizada em canalização de esgotos, por exemplo.



**Figura 8** – Tubulação feita de pneus **Fonte** – Michelin (2000)

### 4.3. RECICLAGEM

Entende-se por reciclagem de um pneu o fato de se conseguir reciclar os componentes de um pneu inservível, mas sob uma forma diferente, ou seja, a reciclagem não acontece sob a forma do próprio pneu e sim de partes destes pneus transformados em borracha triturada ou regenerada, normalmente misturada a outros produtos.

#### 4.3.1. Borracha Triturada

Obtém-se a borracha triturada após a destruição do pneu, que pode ser por trituração mecânica ou criogenia.

A criogenia consiste em fragilizar o pneu dentro de um banho de nitrogênio líquido. O custo, evidentemente, é muito elevado em relação à trituração mecânica, porém o resultado é muito mais satisfatório, pois se obtêm uma carga mais fina, ou seja, com diâmetros de partículas menores, obtendo com isso com mais vantagens.

Na trituração mecânica podem-se obter grânulos de diversos tamanhos, variando de 30 microns a 300 milímetros, sabendo-se que quanto menor a granulação, maior o custo final do processo. Atualmente já existem empresas, localizadas em São Paulo, que são especializadas em trituração de pneus.

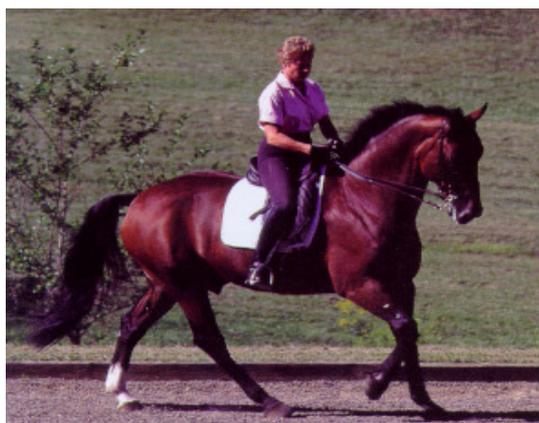
Este material pode, em seguida, ser utilizado em diversas aplicações.

Quando uma borracha vulcanizada (que já sofreu um cozimento a altas temperaturas) é reutilizada dentro de uma borracha nova, esta última terá suas propriedades degradadas um pouco. É considerada como uma borracha de baixa gama, ou seja, de menor qualidade para a utilização proposta. Contudo, as propriedades de elasticidade são mantidas.

Os principais seguimentos de mercado utilizadores de borracha triturada são a engenharia civil e as construtoras. Dentro destes setores, estas borrachas são utilizadas em várias situações descritas a seguir.

- *Fabricação de solos esportivos*

Os compostos de borracha triturados têm um custo muito inferior ao composto sintético e trazem mais flexibilidade e permeabilidade, porém o mercado ainda não confia neste produto. Na fabricação destes pisos, a borracha triturada fica sob a camada ou na superfície do revestimento. Na figura 9 é mostrado um exemplo de utilização de borracha triturada que foi aplicada a solos de treinamento de cavalos e na figura 10 são mostrados os detalhes deste piso emborrachado.



**Figura 9** – Piso emborrachado  
**Fonte** – Michelin (2000)



**Figura 10** – Detalhes do piso emborrachado  
**Fonte** – Michelin (2000)

- *Revestimentos de estradas e calçadas*

A idéia de se misturar betume com borracha é antiga. Os betumes emborrachados têm grandes perspectivas de desenvolvimento, pois eles trazem importantes

características ao asfalto, como a melhoria da capacidade de deformação, melhor resistência à fadiga, menor susceptibilidade às variações de temperatura e uma melhor resistência ao envelhecimento.

Com esta técnica, a borracha triturada encontrou um mercado relativamente promissor, pois existem 1,7 milhões quilômetros de estradas no Brasil, sendo que somente 165 mil quilômetros são asfaltados (DNER, 2002).

A incorporação de borracha de pneus inservíveis em revestimentos asfálticos de pavimentos rodoviários e urbanos têm sido empregada há algumas décadas no exterior. Podemos citar aplicações importantes no Canadá, Portugal, Austrália, África do Sul e principalmente nos Estados Unidos da América. Pesquisas e aplicações de inúmeras técnicas utilizando asfalto borracha já são uma realidade nos estados americanos do Arizona, Califórnia e Flórida (Morilha, 2002).

É evidente que além da melhoria do ligante, a destinação ecologicamente correta dos pneus inservíveis é a grande motivação ambiental desse aproveitamento. Convém ressaltar, que das destinações finais dos pneus já utilizados, uma das mais nobres é a sua incorporação ao asfalto criando um novo tipo de ligante modificado.

A modificação ou melhoria dos ligantes asfálticos utilizados em pavimentação, com adição de borracha de pneus, é considerada uma alternativa atrativa para o melhoramento das propriedades dos materiais betuminosos, principalmente em relação a resistência à tração e à fadiga, bem como do aumento do envelhecimento diminuindo rachaduras e mais resistentes à umidade. (Leite et al, 2000)

Duas são as maneiras mais empregadas de adição da borracha de pneus às misturas asfálticas:

- *Via seca*: a borracha é introduzida diretamente no misturador da usina de asfalto, entrando como um agregado na mistura; a transferência de propriedades importantes da borracha ao ligante é prejudicada;
- *Via úmida*: a borracha e betume são misturados juntos, a altas temperaturas, previamente para produzir o ligante, que é adicionado ao agregado, modificando-o permanentemente. (Oliver, 2000)

Destas, a que maior sucesso tem demonstrado é o processo via úmida, pois promove uma transferência mais efetiva das características de elasticidade e resistência ao envelhecimento para o ligante asfáltico original. Ligante asfáltico é um ligante altamente viscoso que tem por finalidade sua aplicação em tratamentos superficiais a quente em misturas asfálticas descontínuas. Este ligante pode, então, ser modificado por meio da adição, via úmida, de teores entre 12 e 25% em peso de borracha vulcanizada de pneus inservíveis. A

borracha deve ser previamente triturada e finamente pulverizada. O novo ligante modificado apresenta novas propriedades e relações físico-químicas diferentes do ligante original. A adição de borracha ao ligante deve ser executada em um reator próprio exclusivo para este fim e, através também de um processo físico químico adequado, pode ser obtida uma mistura estável de borracha e asfalto, em condições imediatas de utilização.

Uma grande desvantagem deste processo é que a aplicação de asfalto com borracha normalmente é *just in time*, ou seja, a aplicação do ligante no tratamento por penetração ou na mistura asfáltica deve ocorrer em menos de 24 horas. Outra desvantagem é que devido ao caráter altamente viscoso do ligante, se faz necessária à utilização de temperaturas um pouco mais elevadas do que as tradicionalmente empregadas no Brasil, na usinagem e compactação dos asfaltos.

Todavia, ocorrem muitas vantagens entre as quais uma destinação adequada e ambientalmente segura aos pneus inservíveis (atendendo a resolução CONAMA 258/99) e geração de um ligante modificado por borracha vulcanizada de pneus inservíveis. Esta última vantagem melhora muito a textura do asfalto em termos de segurança ao rolamento, imprimindo desta forma uma rugosidade apreciável com características de anti-aquaplanagem (Morilha, 2002).

▪ *Melhoria da impermeabilidade de solos argilosos na percolação de hidrocarbonetos:*

A borracha triturada pode também ser utilizada em misturas com argilas, melhorando a impermeabilidade deste material. As argilas são conhecidamente materiais de baixa permeabilidade, sendo, portanto, indicadas para material de barreira em solos. Entretanto, para percolantes diferentes de água (materiais apolares), esta performance torna-se questionável.

Os permeantes, com menor constante dielétrica do que a água, afetam a dupla camada difusa das argilas, ocasionando um aumento da sua permeabilidade (Anderson et al. , 1985; Mitchel e Madsen, 1987). As argilas, apesar da baixa permeabilidade, valores em torno de  $10^{-7}$  cm/s, permitem a percolação de hidrocarbonetos, os quais são substâncias apolares e com constante dielétrica baixa. Por conta disto, os vazamentos em tanques enterrados com gasolina, linhas de oleodutos e refinarias de petróleo, são algumas das fontes mais importantes de contaminação do solo. No solo, o petróleo altera o comportamento da argila, fazendo com que esta perca a sua plasticidade, passando a se comportar como silte. Por isto, grandes volumes de petróleo podem percolar rapidamente, num curto espaço de tempo (Baykal & Alpatli, 2000).

Estima-se que, nos Estados Unidos 30% dos 2 milhões de tanques enterrados em todo o país, contaminem o solo com derivados de petróleo (Corseuil, 1996), sendo que a maioria destes encontra-se em áreas urbanas, o que aumenta ainda mais a gravidade dos impactos provocados (Elzedin et al, 1992). Devido aos custos legais elevados, muitos postos de gasolina pequenos estão sendo desativados, quando estes se encontram com o solo contaminado. No Brasil existem 27.000 postos de gasolina e para se ter uma idéia do problema, só em Joinville, a prefeitura local estudou 65 postos da cidade e constatou que somente 1 posto não continha nenhum problema de contaminação do lençol freático (Corseuil, 1996).

Ao se misturar pedaços de borracha triturada com a argila e posteriormente, compactar esta mistura, até formar uma barreira homogênea, o petróleo, quando de sua percolação, passará pela borracha, que absorverá parte desse petróleo, aumentando o seu volume, e com esta expansão, ocupará os espaços vazios deixados pela argila, selando os poros da barreira. Com este aumento da capacidade de absorção pela mistura borracha-argila, a contaminação é retardada, proporcionando um tempo maior para a detecção e limpeza, antes mesmo da contaminação migrar para áreas mais distantes (Baykal & Alpatli, 2000).

Esta borracha triturada pode ser conseguida através da trituração de pneus inservíveis, dando com isso, mais uma alternativa para aproveitamento deste material de uma maneira ambientalmente correta.

Existem inúmeras vantagens da adição da borracha triturada à argila e estas vantagens podem ser descritas como o aumento da impermeabilidade do solo em função da expansão da borracha e conseqüentemente a pressão que ela exerce sobre o próprio solo; grande capacidade de absorção de petróleo pela borracha, retardando a contaminação do solo, nas redondezas; os pedaços de borracha agem como excelente agente reforçante para o solo, diminuindo possibilidades de fraturas, devido ao seu formato e altas tensões comparadas ao solo; reduz a propagação de fraturas na barreira de proteção e minimiza o escoamento do permeado através das fraturas, pois este será absorvido pela borracha, selando as fraturas.

A performance da atuação de barreiras de borracha-argila em contaminações por hidrocarbonetos, depende das características da expansão da borracha adicionada à argila, sendo que em alguns casos, a borracha vulcanizada e triturada pode absorver hidrocarbonetos ao tal ponto de que seu volume final possa aumentar em 2,5 vezes o seu volume original (Baykal & Alpatli, 2000).

A quantidade ótima de borracha adicionada para o funcionamento com sucesso da barreira de proteção deve ser bem estudada, de forma que esta quantidade não promova a

flutuação da borracha no momento da percolação. Estudos realizados com adição de 10% de borracha, em peso, deram excelentes resultados (Baykal & Alpatli, 2000).

Alguns tipos de borracha, como por exemplo o neoprene, não apresentam bons resultados, quanto ao aumento de tempo da percolação.

Por não apresentarem nenhum tipo de fratura a altas tensões, a mistura borracha-argila se apresenta como uma excelente técnica para a construção de barreiras de proteção para vazamentos de derivados de petróleo, como por exemplo, a gasolina.

- *Outras utilizações:*

Pode-se ainda utilizar a borracha triturada em diversos seguimentos como a fabricação de tapetes e juntas; a proteção de camada estanque de terraços e piscinas; isolamento acústico quando misturada ao chumbo, pois absorve as ondas acústicas devido a sua elasticidade e ao alto peso molecular; como isolamento térmico; como muros de tiro ao alvo.

Enfim, o processo de trituração da borracha permite a separação de compostos do pneu (aço e borracha), bem como a fabricação de revestimentos flexíveis. Contudo, o preço de transformação é elevado e a capacidade de produção é baixa, pois é muito difícil triturar um produto vulcanizado, recheado com aço, como é o pneu. Estes fatores decorrem de custos de transportes, estocagens, manutenção, cortes, trituração, etc.. Por isto, sua utilização ainda é inexpressiva.

#### 4.3.2. Regeneração da Borracha

O objetivo deste processo é devolver ao material vulcanizado as propriedades originais do material, de onde ele se originou. Ele chega a quebrar as pontes de vulcanização, ligando as moléculas entre elas, dentro da borracha vulcanizada. A borracha deve se apresentar sob a forma de grânulos ou triturada (Masdoumier, 1994).

Entretanto, o processo de regeneração não permite tratar todas as borrachas. Algumas regenerações não são possíveis, as das borrachas saturadas, ou quase saturadas, devido à característica não oxidável ou dificilmente oxidável.

Em função do processo de vulcanização da borracha, onde se utiliza a temperatura versus tempo, em uma determinada pressão, fica impossível reverter tal processo e por conseguinte regenerar inteiramente uma borracha vulcanizada. Regenerar uma borracha vulcanizada pode ser definido como dar uma nova vida ao produto, em face da

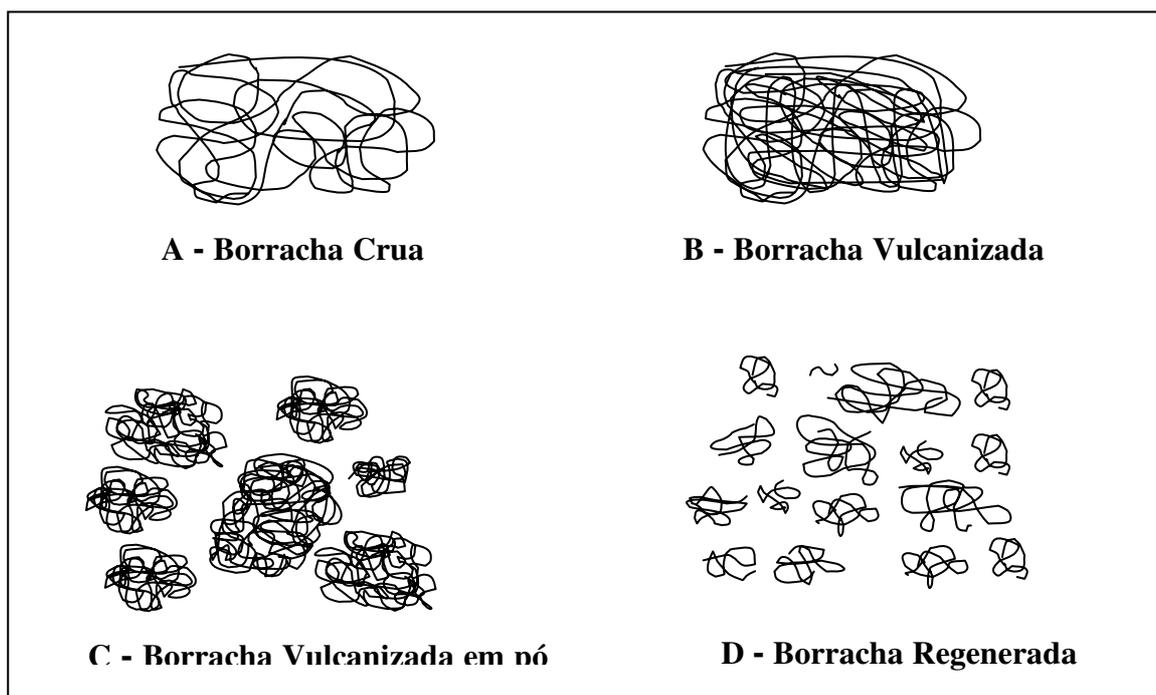
impossibilidade de reconstituir e separar todos os produtos que reagiram na composição original do artigo de borracha, por exemplo, um pneu.

O regenerado tem as suas características próximas da composição original de borracha e quanto mais próximas essas características, melhor é a qualidade do regenerado.

A regeneração da borracha vulcanizada é um fenômeno de superfície, isto é, ela é feita na superfície da partícula ou grão da borracha vulcanizada, sendo, portanto, impossível de atingir o interior das cadeias químicas. No caso de um processo térmico, o calor quebra a borracha vulcanizada em pedaços menores, provocando um “craqueamento” como no processamento do petróleo, sendo que neste caso o craqueamento é aleatório, e os pedaços se apresentam em tamanhos variados, e heterogêneos, pedaços esses grandes ou pequenos.

Uma desvantagem desse processo é que o mesmo não pode ser empregado por um tempo muito longo ou não se pode utilizar maior pressão de vapor de água na digestão, uma vez que a mistura pode vir a se transformar em uma pasta ou em um óleo.

A figura 11 apresenta as diversas fases da borracha. O desenho A mostra o modelo de uma macromolécula de elastômero ainda crua, ou seja, sem estar vulcanizada. Esta macromolécula é semelhante a uma esponja de fio metálico. No desenho B, é apresentada uma macromolécula vulcanizada com ligações tridimensionais do vulcanizante, sendo o enxofre o mais utilizado. No desenho C é representada a borracha vulcanizada em pó, onde simplesmente a mesma foi triturada e moída, mantendo-se em todas as partículas, agora menores, as mesmas características da borracha vulcanizada. No desenho D, é mostrada a borracha regenerada pelo processo térmico ou convencional.



**Figura 11:** Fases da Borracha

**Fonte -** Cunha Lima & Hemais (1997)

A borracha regenerada é utilizada na composição de borracha como carga semi-reforçadora para baratear o preço do produto final, cujas especificações se enquadram dentro de suas características. Pode-se utilizar a borracha regenerada em tapetes, solados, protetores de câmaras de ar, lençóis, passadeiras, mangotes, câmara de ar, câmaras de recauchutagem, etc. Portanto, a borracha regenerada deve ser utilizada em produtos com exigências menores de qualidade.

A regeneração da borracha pode ser efetuada através de dois métodos: o método térmico ou convencional e o método de cisalhamento. A regeneração pelo método térmico ou convencional é aplicada a poucos tipos de composições de borracha vulcanizadas; as mesmas limitações acontecem com o método de cisalhamento. Com isso, ambos os métodos têm limitações quanto a qualidade e ao preço.

O princípio do *método térmico* é continuar a vulcanização da borracha, que já se encontra vulcanizada, até começar a deterioração pelo calor, o que irá destruir todo o resto dos produtos químicos existentes na composição. O craqueamento, então, é aleatório e, portanto heterogêneo, fazendo com que o produto obtido deste craqueamento tenha características pobres quanto à qualidade e a ação do refino seja dispendiosa, pois consome muita energia elétrica. Porém, este método é o mais utilizado atualmente para regeneração de borrachas vulcanizadas, principalmente àquelas destinadas a aplicação em solados, tapetes e passadeiras.

O *método de cisalhamento*, embora não aqueça tanto quanto o método térmico, leva mais tempo e consome mais energia elétrica, pois o mesmo é realizado em misturadores, refinadores ou extrusoras. É neste método que se regenera composições de borracha natural, estireno-butadieno (SBR) e acrilonitrilas. (Cunha Lima & Hemais, 1997)

A regeneração da borracha vulcanizada, geralmente, pode ser obtida por três tipos de quebra de cadeia, Carbono – Carbono ou Carbono – Enxofre ou ainda Enxofre – Enxofre. As cadeias mais fáceis de serem quebradas são as de carbono – carbono, embora o fenômeno possa ocorrer também nos outros tipos de cadeias.

Os tipos de processos existentes para a obtenção da borracha regenerada estão apresentados na tabela 10. Podem ser físicos, químicos ou físico-químicos.

**TABELA 10** : Processos de obtenção de borracha regenerada

<b>PROCESSOS</b>		
<b>FÍSICOS</b>	<b>QUÍMICOS</b>	<b>FÍSICO-QUÍMICOS</b>
Tratamento em óleo Tratamento térmico Cisalhamento Microondas Radiações	Peptizantes Oxi-reduções	Catalisadores

**Fonte** - Cunha Lima & Hemais (1997)

Descrevem-se sucintamente os processos a seguir.

#### Processos Físicos

- *Tratamento em óleo*: a borracha deve ser fervida em óleo por muitos dias. O processo de tratamento em óleo já foi muito utilizado, mas tem o seu uso limitado face ao grande desperdício de energia.

- *Tratamento térmico*: são os processos de tratamento com vapor d'água, quer sejam em autoclaves ou em digestores, onde são adicionados óleos, asfalto e peptizantes à mistura, que depois será refinada. O processo é pouco utilizado quando realizado sozinho. Normalmente, é acompanhado por outro processo, que pode ser químico ou mecânico.

- *Cisalhamento*: o processo mais empregado é o de moagem da borracha vulcanizada com peptizantes, por moinhos de rolos ou regeneradores e por extrusoras. O processo, da mesma forma que o térmico, é pouco utilizado sozinho, uma vez que se torna muito dispendioso.

- *Microondas*: É uma técnica relativamente recente, que permite tratar dentro de uma câmara ressonante de tipo multietapas, sob a ação de microondas, os despejos moídos de vulcanizados de borracha. É importante ressaltar que este ainda não é um processo rentável e confiável. O produto obtido possui propriedades mecânicas frágeis. Da mesma forma, as instalações são caríssimas porque independem das usinas de transformação de borracha. A aparelhagem pode ser instalada dentro de um centro de produção de borracha, a fim de assegurar uma reciclagem imediata. Esta aparelhagem é constituída de um gerador de grande potência de trabalho (acima de 2000MHz) e uma câmara de Microondas (Masdouquier, 1994).

#### Processos Químicos

- *Peptizantes*: São processos que utilizam produtos químicos como agentes de quebra da borracha vulcanizada. Assim como o processo de cisalhamento, não é usado sozinho pois são muito lentos. Os processos são, em geral, usados em conjunto com o processo térmico ou com o de cisalhamento. As guanidinas, hidrazinas, sais de zinco, derivados clorados dos tiofenóis são os compostos químicos mais comuns utilizados como peptizantes. Estes produtos são

misturados em pequenas quantidades à borracha vulcanizada, triturada e digerida em presença de vapor d'água, e assim se tornam eficazes a certas temperaturas.

- *Oxi-reduções*: São produtos que, adicionados em etapas ao pó da borracha vulcanizada, provocam uma reação de oxi-redução na superfície do grão, regenerando a borracha. Os produtos mais utilizados para este processo são o cloreto férrico e derivados da hidrazina (Cunha Lima & Hemais, 1997).

#### Processos Físico-Químicos

- *Catalisadores*: É o processo através do qual a borracha vulcanizada é regenerada por contato com elementos deletérios, como o cobre, manganês, cobalto, ferro, níquel, suas ligas ou derivados. Este é um processo pouco utilizado atualmente, pois foi pouco desenvolvido (Cunha Lima & Hemais, 1997).

Os processos industriais mais utilizados atualmente para a regeneração da borracha são os processos térmicos, utilizando autoclaves (ou panelas) e o de digestores. Ambos os processos utilizam calor, gerando produtos não reforçados, e usam a borracha vulcanizada, moída em quebradores, com granulometria em torno de 5 mesh. São opcionais o uso de peptizantes, óleos, resinas, asfalto e pequenas quantidades de solventes. Alguns processos usam ar ou oxigênio como meio de oxidação, com pressões variáveis de vapor d'água que, normalmente, variam de 5 a 50 kg/cm<sup>2</sup>. O tempo de regeneração é função da temperatura e do grau de oxidação, ficando de 5 minutos a 24 horas. Quanto mais alta a temperatura, menor será o tempo de regeneração da borracha.

- Processo de Autoclaves:

A regeneração inicia com a borracha vulcanizada moída e homogeneizada em moinhos quebradores. Seguindo uma formulação, que vai depender do emprego de regenerado, são misturados os ingredientes, como peptizantes, óleos, resinas, solventes, asfalto, etc.. Em seguida, são preenchidas as panelas, geralmente rasas, para sofrerem a ação do vapor e do agente oxidante, e colocadas na autoclave. O tempo é função da pressão do vapor de água. Após a descarga, o regenerado é resfriado e laminado no refinador. Dependendo da natureza do regenerado, passa de duas a quatro vezes pelo refinador. A intenção é formar uma película de, aproximadamente, 0,05 mm de espessura, contínua e homogênea, que é enrolada formando uma manta grossa de mais ou menos 60-80 mm de espessura. A manta é cortada e prensada, formando fardos com cerca de 25 kg.

- Processo de Digestores:

Da mesma forma que o processo de autoclaves, o início deste processo é similar. Apenas a mistura é feita dentro do digestor, que movimenta em seu interior, através de pás ou fitas, a borracha vulcanizada moída, assim proporcionando um melhor contato entre a borracha e os agentes de regeneração. Após a descarga do digestor, o regenerado é resfriado e refinado. O processo de digestores oferece um produto mais homogêneo e leva aproximadamente a metade do tempo do processo de autoclave.

As aplicações do regenerado pelo processo a quente, isto é, utilizando a temperatura como meio de produzir a quebra da borracha vulcanizada, são limitadas, em sua maioria na substituição da borracha virgem em suas composições, como em pneus, *camelback*, tapetes, passadeiras, lençóis, artefatos automotivos em geral, colas e adesivos, borrachas duras e asfalto.

Nessas composições, a participação do regenerado varia de 10 a 100 por cento. Entretanto, é necessário tomar muito cuidado com a aplicação do regenerado, principalmente onde existem algumas das seguintes características: geração de calor, baixo módulo de resiliência, alta resistência à abrasão, baixa deformação, não contaminação, etc.. É imprescindível que se conheça a borracha vulcanizada e os produtos que compõem a formulação do regenerado para manter uma regularidade em suas características.

Atualmente, o uso de borracha regenerada não é bem aceito, visto que suas características são muito baixas, inferiores à qualquer composição com elastômero virgem e ainda o regenerado proveniente do processo térmico tem um odor não muito agradável. Além disso, o processo é poluente, atingindo não só a atmosfera como também os efluentes líquidos. Por conta disso, todos os cuidados ambientais, como filtros e tratamento de efluentes, devem estar acoplados ao processo de regeneração de borracha.

#### 4.4. RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

Outra forma de valorização além dos três tipos apresentados é a recuperação energética.

O desenvolvimento desta última, para o futuro, parece importante. De fato, nesta técnica pode-se consumir grandes quantidades de pneus. A recuperação energética representa a possibilidade de, por si só, resolver quase que a totalidade do problema da disposição de pneus inservíveis.

Neste caso, o pneu é considerado um combustível. Ele possui um excelente poder calorífico que permite se aproximar do carvão. É certo que, 14 toneladas de pneus usados correspondem a 14 toneladas de carvão ou 10 toneladas de óleo combustível (Holcin, 1998).

A incineração, com a recuperação calorífica do resíduo (pneus inservíveis), é chamada de incineração com valorização energética.

A valorização energética consiste, durante a queima do pneu, na recuperação direta da energia produzida, seja por fornecimento de vapor ou produção de eletricidade.

#### 4.4.1. Incineração Energética

A incineração é o processo mais antigo e o mais empregado de tratamento térmico de resíduos, sendo feita normalmente a 800°C. Os gases de combustão devem-se manter a 1200°C por cerca de 2 segundos, com excesso de ar e turbulência elevada a fim de garantir a conversão total, dos componentes orgânicos presente nos resíduos, a gás carbônico e água. Os teores de oxigênio nos gases de combustão devem ficar acima de 7% em volume (IPT/CEMPRE, 2000). Os pneus inservíveis, que são classificados como resíduos sólidos Classe III - inertes, conforme a resolução CONAMA N.º 235, de 7 de janeiro de 1998, estão tendo destinação final em incineradores, porém com uma finalidade mais específica, em função de seu alto poder calorífico, portanto sendo utilizados para incineração energética. Atualmente, as indústrias que praticam a incineração de pneus já possuem os fornos adequados e utilizam este material como combustível.

São exemplos de indústrias utilizadoras deste 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 este processo chamado de co-processamento. Ainda há a possibilidade dos pneus inservíveis serem utilizados em centrais térmicas a carvão, para a produção de eletricidade.

Nas indústrias siderúrgicas, o pneu inservível substitui o coque, e participa da redução do minério de ferro. Já em misturas com lixo doméstico, em usinas de incineração de lixo, pode-se permitir uma quantidade de pneus inservíveis, de uma maneira bem controlada, ou seja, quando o poder calorífico do lixo urbano for baixo, os pneus podem ser utilizados como combustível. À medida que este poder calorífico do lixo aumentar, vai-se diminuindo a

quantidade de pneus misturados a ele, podendo até ser inviável a mistura, para evitar um aumento excessivo da temperatura dos fornos incineradores.

Nas centrais térmicas a carvão para a produção de eletricidade, os pneus inservíveis são utilizados como combustível, substituindo em parte o carvão, em percentuais que variam de 10% a 20% nos Estados Unidos. Estas centrais já funcionam no Japão com consumo de 148.000 toneladas de pneus / ano), nos Estados Unidos e na Alemanha com consumo, em cada país, de 20.000 toneladas de pneus inservíveis / ano (Almon et al., 2001). Porém o consumo de pneus inservíveis nesta alternativa pode estar comprometido em função da tendência atual de substituição do carvão por combustíveis mais limpos, como o gás natural.

#### *Indústrias Cimenteiras:*

São as grandes consumidoras de energia. Além de utilizarem a energia da queima do pneu, o resíduo também é aproveitado como carga no cimento, pois os materiais (aço + carbono = coque) são compatíveis com o cimento ali produzido.

Este método, também conhecido como co-processamento, se baseia no fato de que, além de aproveitar o poder calorífico do pneu como combustível, aproveita as cinzas como material constituinte na formulação do cimento. Assim, na teoria, todo o pneu é transformado em utilidade e não há nenhum resíduo final.

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

Atualmente já existem indústrias de cimento que foram projetadas exclusivamente para consumo de pneus inservíveis como combustível, e sendo assim, o projeto já previu uma possibilidade de consumo de pneus em pedaços maiores, com poucos cortes e nenhuma trituração.

Co-processamento é uma técnica que se utiliza das excelentes condições do processo de fabricação do clínquer do cimento para a destruição de diversos tipos de resíduos industriais, de forma segura e definitiva. Dentre estes resíduos industriais, está o pneu inservível.

O co-processamento de pneus em fornos de cimento é uma resposta atual segura para a disposição final deste material.

As concentrações de metais pesados situam-se em uma faixa onde são facilmente incorporadas ao clínquer do cimento (Vide tabela 5, no capítulo 3). Os pneus contêm também elementos como ferro, que pode incorporar-se ao clínquer do cimento como substitutivo de matéria-prima.

No co-processamento existem condições favoráveis para esta destinação final: alta temperatura, elevado tempo de residência (que evita a liberação de emissões prejudiciais ao meio ambiente), o alto efeito absorvedor da matéria-prima no pré-aquecedor e a incorporação das cinzas geradas ao clínquer do cimento.

Além dessas condições favoráveis, o poder calorífico do pneu, cerca de 7000kcal/kg, contribui para a diminuição do consumo de combustíveis não renováveis, como carvão e óleo, poupando desta forma os recursos naturais.

Diversas fábricas de cimento na Europa e nos Estados Unidos estão co-processando pneus nos fornos de clínquer. Os dados apresentados a seguir comprovam que esta prática não afeta o processo de produção, não prejudica a qualidade do clínquer e não provoca emissões atmosféricas significativas. A tabela 11 apresenta a grande quantidade de fábricas de cimento espalhadas por todo o mundo que já fazem o co-processamento de pneus.

**Tabela 11 – Co-processamento de Pneus em Fornos de Clínquer**

<b>País</b>	<b>N.º de fábricas</b>
Japão	23
Alemanha	20
EUA	14
Áustria	6
Suíça	3
Bélgica	2
Eslováquia	2
França	2
República Checa	2
Canadá	1
Itália	1
Portugal	1
Reino Unido	1
<b>Total</b>	<b>78</b>

**Fonte -** Rosenhoj (1993)

No Brasil, em função de todas as plantas instaladas e da capacidade total de produção cimenteira, o potencial de co-processamento de pneus é de 1,4 milhões de toneladas por ano. Porém, em 2001, o co-processamento de pneus ficou em apenas 160 mil toneladas, ou seja, apenas 11,4 % do potencial (Holcin, 1998).

Os Grupos Holcin e Cimpor estão preparados para o co-processamento de pneus e já o fazem atualmente, num total de 4 fábricas, 2 de cada Grupo, espalhadas em 4

estados diferentes: São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Paraíba. Além deles, algumas fábricas da Votorantim e Lafarge começam também a trabalhar neste sentido. Na tabela 12 tem-se a distribuição do parque industrial de cimento no Brasil.

**Tabela 12 – Parque Industrial de cimento no Brasil**

<b>Empresa</b>	<b>%</b>
Votorantim	41,7
João Santos	11,4
Cimpor	9,1
Holcim	8,9
Lafarge	8,4
Camargo Corrêa	8,1
Tupi	5,4
Soecom	3,0
Itambé	2,2
Outros	1,8

**Fonte - Holcim (1998)**

O acompanhamento e o monitoramento do co-processamento 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 normalizações, não havendo influência na quantidade total de material particulado emitido, na quantidade total emitida de metais pesados, na emissão de SO<sub>2</sub>. Por último, existe pouca influência da emissão de CO, desde que o co-processamento de pneus seja devidamente controlado (controle de O<sub>2</sub>, definição correta da taxa e do ponto ótimo de alimentação de pneus) (Holcim, 1998).

A tabela 13 compara as emissões atmosféricas em fornos operando na Inglaterra com 100% de carvão e fornos com 18% de substituição energética com pneus. Os resultados demonstram que o co-processamento de pneus provoca algumas mudanças nas emissões de gases, porém todos os parâmetros se mantêm dentro dos limites de tolerância previstos na NBR-11175/1990, que trata de incinerações de resíduos sólidos perigosos. Por exemplo, há um acréscimo nas emissões de CO em 48%, Pb em 123% e Zn em 108%, sendo que este último é um dos componentes mais expressivos do pneu. O restante permaneceu quase que inalterado, chegando às vezes, em alguns casos, até diminuir, como é o caso do SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COT (Carbono Orgânico Total) e Dioxinas.

**Tabela 13** – Análises dos gases de exaustão na Inglaterra

<b>Itens</b>	<b>100% carvão</b>	<b>18% pneus</b>
Material particulado (g/t)	230	226
O <sub>2</sub> %	9,5	9,4
CO ppm	134	199
SO <sub>2</sub> ppm	260	249
NO <sub>x</sub> ppm	936	789
TOC ppm	105	56,9
Zn (mg/Nm <sup>3</sup> )	0,185	0,385
Fe (mg/Nm <sup>3</sup> )	0,873	0,950
Pb (mg/Nm <sup>3</sup> )	0,121	0,270
Cr (mg/Nm <sup>3</sup> )	0,048	0,058
Hg (mg/Nm <sup>3</sup> )	0,055	0,011
Naftaleno (µg/Nm <sup>3</sup> )	76	66
Poluentes Perigosos (µg/Nm <sup>3</sup> )	84	70
Clorobenzol (µg/Nm <sup>3</sup> )	1,7	0,9
Clorofenol (µg/Nm <sup>3</sup> )	<0,07	<0,07
Dioxina/Furano (µg/Nm <sup>3</sup> )	0,001	0,0004

**Fonte** - "Holderbank News" (1996)

Quanto à qualidade do produto, comprova-se que não ocorrem influências negativas na qualidade do clínquer.

No co-processamento pode-se trabalhar com a reciclagem de pneus inservíveis inteiros ou em pedaços, porém em ambos os casos, estes pneus devem estar isentos de matéria estranha e/ou água. Um diâmetro externo máximo de 1200mm e uma largura máxima de 380mm, que são as dimensões máximas de pneus de carga, são imperativos para um carregamento uniforme nos fornos de clínquer. Outro item importante é que, sempre que possível, os pneus devem ser coprocessados tão logo seja feito o desembarque dos mesmos, vindo do fornecedor, evitando com isso, construções de depósitos destes pneus e poluição dos mesmos pela intempérie (chuvas, vento, etc..)

A instalação para a alimentação de pneus é composta de uma rampa, que direciona os pneus até a câmara de fumaça, e de válvulas pneumáticas de maneira a minimizar a entrada de ar no falso forno e controlar a taxa de alimentação. As válvulas são temporizadas e permitem uma taxa de alimentação pré-fixada em testes de homologação. Quando da parada do forno, todas as válvulas fecham-se imediatamente, impedindo a entrada de pneus.

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

- a temperatura dos gases na câmara de fumaça deve ser maior de 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%;



Para tal, considerou-se, então a emissão total máxima hipoteticamente de 7,0 mg/Nm<sup>3</sup> (idêntica a da Classe III da Norma NBR-11175) e, com uma taxa de retenção de zinco no clínquer de 87%.

$$\text{Taxa Máxima de Alimentação} = \frac{\text{emissão}(\text{Zn}) \times \text{vazão chaminé}}{\text{Conc.}(\text{Zn}) \times (1-0,87)}$$

**Pneus de Passeio:** Taxa Máxima de Alimentação = 1.120,40 kg/h

**Pneus de Carga:** Taxa Máxima de Alimentação = 1.400,16 kg/h

#### Taxa de co-processamento

Situação 1:

Pneu 100% Passeio: (1 pneu a cada 30 segundos = 120 pneus/h)

Peso do Pneu = 8 kg

Total = **960 kg/h**

Situação 2:

Pneu 100% Carga: (1 pneu a cada 2 minutos = 30 pneus/h)

Peso do Pneu = 60 kg

Total = **1.800 kg/h**

Situação 3:

Pneu 66% Passeio + 33% Carga:(1 pneu a cada 1 minuto e 20 segundos = 45 pneus/h)

Seqüência: Passeio  $\implies$  Passeio  $\implies$  Carga  $\implies$  Passeio  $\implies$  Passeio  $\implies$  Carga ....  
e, assim, sucessivamente

30 Pneus de Passeio/h x 8 kg = 240 kg/h

15 Pneus de Carga/h x 60 kg = 900 kg/h

Total = **1.140 kg/h**

Pode-se, a partir de agora, estimar a taxa de emissão para o Zinco, de acordo com as 3 taxas de co-processamento propostas acima:

- vazão de gases na chaminé: 280.000 Nm<sup>3</sup>/h

- retenção de zinco no clínquer: 87%

Cálculos:

$$\text{Emissão estimada de Zn} = \frac{\text{conc.}(\text{Zn}) \times (1-0,87) \times \text{taxa de co-processamento}}{\text{vazão chaminé}}$$

**Situação 1:**

Pneu 100% Passeio : 960 kg/h

Emissão estimada de Zn = 5,97 mg/Nm<sup>3</sup>

### **Situação 2:**

Pneu 100% Carga : 1.800 kg/h

Emissão estimada de Zn = 9,00 mg/Nm<sup>3</sup>

### **Situação 3:**

Pneu 66% Passeio + 33% Carga : 1140 kg/h

Emissão estimada de Zn = 6,00 mg/Nm<sup>3</sup>

Em função dos resultados teóricos obtidos, se faz necessário, primeiramente, iniciar o monitoramento pela taxa máxima de alimentação calculada anteriormente. De posse dos resultados práticos da emissão, verifica-se a adequação dos parâmetros analisados aos limites máximos estabelecidos pela norma NB 1265. Se o valor obtido para o zinco estiver dentro dos limites aceitáveis, faz-se, então, um segundo monitoramento com a taxa de coprocessamento proposta na situação 3, ou seja, com 1.140 kg/h de pneus, alternando pneus de passeio com pneus de carga. Caso os resultados de emissão permanecerem dentro dos limites máximos estabelecidos pela norma, e os valores obtidos para o zinco estiverem dentro dos limites aceitáveis, o co-processamento passa a obedecer a taxa de alimentação proposta.

O co-processamento deve ser também monitorado através de controles contínuos existentes de concentração de CO, O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> e temperatura na câmara de fumaça; concentração de CO e O<sub>2</sub> no segundo estágio, que permite controlar e verificar qualquer perturbação de operação do forno.

#### 4.4.2. Pirólise

É um método de tratamento térmico à alta temperatura, pirolítico com oxidação controlada, sob uma atmosfera pobre em oxigênio, dentro de uma câmara de combustão. As temperaturas ficam compreendidas entre 400°C e 500°C. Quanto mais alta a temperatura, mais se obtém produtos gasosos e menos os produtos líquidos (Masdoumier, 1994).

Este processo é muito utilizado para tratamento de resíduos perigosos, e objetiva, ao mesmo tempo, a redução do volume e a eliminação das características indesejáveis dos mesmos, de forma a minimizar os riscos para o meio ambiente e para a saúde pública.

Os resíduos introduzidos sobre o Leito de Combustão se distribuem sobre o trecho inicial, e são revolvidos e deslocados ao longo da área de combustão até a extremidade de descarga de escórias e cinzas. O revolvimento expõe uma maior área do material combustível ao contato com o ar sob condições controladas e à radiação térmica no seu interior, realizando-se a pirólise.

A velocidade de deslocamento do material é controlada por dispositivos de controle da velocidade de rotação e da inclinação do leito. Na primeira seção da Fornalha Rotativa, onde ocorre a secagem e a ignição do material, o movimento de deslocamento e atijamento se dá com maior intensidade. Na segunda seção, a combustão se desenvolve por mais tempo devido a progressiva redução do volume de resíduo processado bem como de se reduzir propositalmente a velocidade de deslocamento e a intensidade do revolvimento. Na terceira e última seção, onde a velocidade de deslocamento é a menor de todas, a intensidade é baixa e ocorre a conclusão da pirólise da matéria orgânica contida no seu interior.

No caso, onde se utiliza a pirólise de pneus, a decomposição aquecida do pneu, em atmosfera pobre em oxigênio, acontece no interior da câmara de combustão. Os produtos obtidos são diversos combustíveis, podendo ir do gás ao carbono, assim como o aço, para a indústria siderúrgica. Alguns exemplos de produtos obtidos da pirólise de pneus:

- óleos parafínicos e aromáticos, que podem ser utilizados, após o refino, para a produção de vapor;
- negro de carbono para incorporação como agente reforçante em materiais de borracha;
- carvão ativo para filtros utilizados em tratamento de águas;
- gás utilizado para pré-aquecimento de ar insuflado dentro de fornos;
- coque.

A pirólise, quando utilizada em pneus inservíveis, têm algumas vantagens em relação a outros resíduos, como a auto-suficiência do processo em que se concerne a energia, pois parte dos gases e dos produtos líquidos podem substituir o óleo combustível; comparado aos incineradores tradicionais, o investimento é 7 vezes inferior, pois as temperaturas são mais baixas, opera sem consumo de ar e não gera grandes quantidades de gases, evitando assim um sistema de purificação mais sofisticado; os produtos sólidos e líquidos obtidos são facilmente transportáveis e estocáveis, podendo ser utilizados posteriormente; todos os tipos de pneus podem ser utilizados e não há necessidade de trituração dos pneus menores.

Atualmente, no Brasil, esta alternativa para destruição de pneus inservíveis está sendo muito utilizada pela Petrobrás, em São Mateus do Sul, no estado do Paraná, com o Processo Petrosix.

O processo Petrosix, que é patenteado pela Petrobrás, foi inicialmente desenvolvido para retortagem exclusiva do xisto. A SIX (Unidade de Negócios da Industrialização do Xisto da Petrobrás) produz óleo, GLP, gás combustível e enxofre a partir do processamento do xisto há mais de 20 anos e passou a misturar pneus picados à rocha de xisto a partir de maio de 2001 em suas plantas industriais, obtendo um acréscimo no volume destes produtos. Esta mudança ocorreu em função de várias razões e trouxe uma alternativa para a recuperação energética adequada dos pneus inservíveis.

A primeira razão está relacionada à *saúde pública*, visto que os pneus servem de acúmulo de água, a qual favorecem a proliferação de insetos vetores de doenças infecciosas como dengue, febre amarela, filariose e malária, esta última na região norte. Além, de tornar-se ambiente favorável a roedores, que transmitem doenças ao homem através de mordedura, fezes e urina (leptospirose, gastroenterite, etc..) Outra razão importante foi o sabido *passivo ambiental* de pneus inservíveis dispostos inadequadamente por todos os lugares. A *resolução CONAMA 258/99* foi também uma importante ferramenta para as mudanças de planos, assim como a *tecnologia conhecida* pela Petrobrás, onde os pneus podem ser transformados em óleo, gás e enxofre.

No Processo Petrosix, são adicionados à carga de xisto processada 5% em peso de pneus inservíveis picados, o que permite reaproveitamento de 140 mil toneladas de pneus anualmente. Isto equivale a 17,5 milhões de pneus de passeio ou a 2,33 milhões de pneus de carga (Ambiente Brasil, 2002)

O processo inicia-se com o recolhimento e armazenamento dos pneus em diversas regiões do país; na seqüência vem a etapa de transporte entre o armazenador e o picotador, seguida do trabalho de picotagem e de transporte do pneu picado para a SIX. Cabe a SIX, o armazenamento e o co-processamento dos pneus bem como o transporte e disposição do material inerte oriundo do processo.

Os resultados obtidos com a adição de pneus inservíveis ao Processo Petrosix são extremamente satisfatórios, tanto em relação aos produtos obtidos quanto ao meio ambiente.

Uma tonelada de pneus rende cerca de 530 kg de óleo, 40 kg de gás, 300 kg de negro de carbono e 100 kg de aço. Os produtos gerados pelo processamento do xisto adicionado de pneus picados são óleo, gás combustível e enxofre. O óleo do pneu tem poder calorífico de 10.182 kcal/kg, sendo que o gás tem poder calorífico de 8.015 kcal/kg. O enxofre é utilizado na agricultura, indústria farmacêutica e na indústria de vulcanização. Os resíduos - xisto e pneu retornado - podem ser aproveitados como combustíveis para

termelétrica ou insumos para indústrias cerâmicas e o arame pode ser reciclado em indústrias siderúrgicas (Ambiente Brasil, 2002).

A figura 12 mostra o esquema do Processo Petrosix em atividade no estado do Paraná. Os pneus inservíveis (previamente picados) são misturados ao xisto e a mistura é levada por uma correia transportadora a um reator cilíndrico vertical – conhecido como retorta – para ser aquecida a uma temperatura de aproximadamente 500°C. Com o aquecimento, o mineral libera matéria orgânica em forma de óleo e gás. Em seguida, o xisto e a borracha passam por outra etapa, desta vez de resfriamento, que resulta na condensação de vapores de óleo na forma de gotículas, que são transportadas para fora da retorta pelos gases. Essas gotículas, coletadas, constituem o óleo pesado. Após a retirada desse óleo, os gases do xisto passam por outro processo de limpeza para a retirada do óleo leve. O restante é encaminhado para a unidade de tratamento de gases, onde são produzidos mais dois tipos, o gás combustível e o gás liquefeito (GLP). Nesta etapa é feita a recuperação do enxofre.

Com a retirada do óleo e do gás, o resíduo que sobra é uma mistura de xisto e pneus retortados, considerado um material inerte, que retornará para as cavas da mina, para ser recoberto por uma camada de argila e solo vegetal, permitindo assim a utilização da área para a criação de animais, plantio ou urbanização. Este procedimento faz parte do processo de reabilitação de áreas mineradas pela Petrobras.

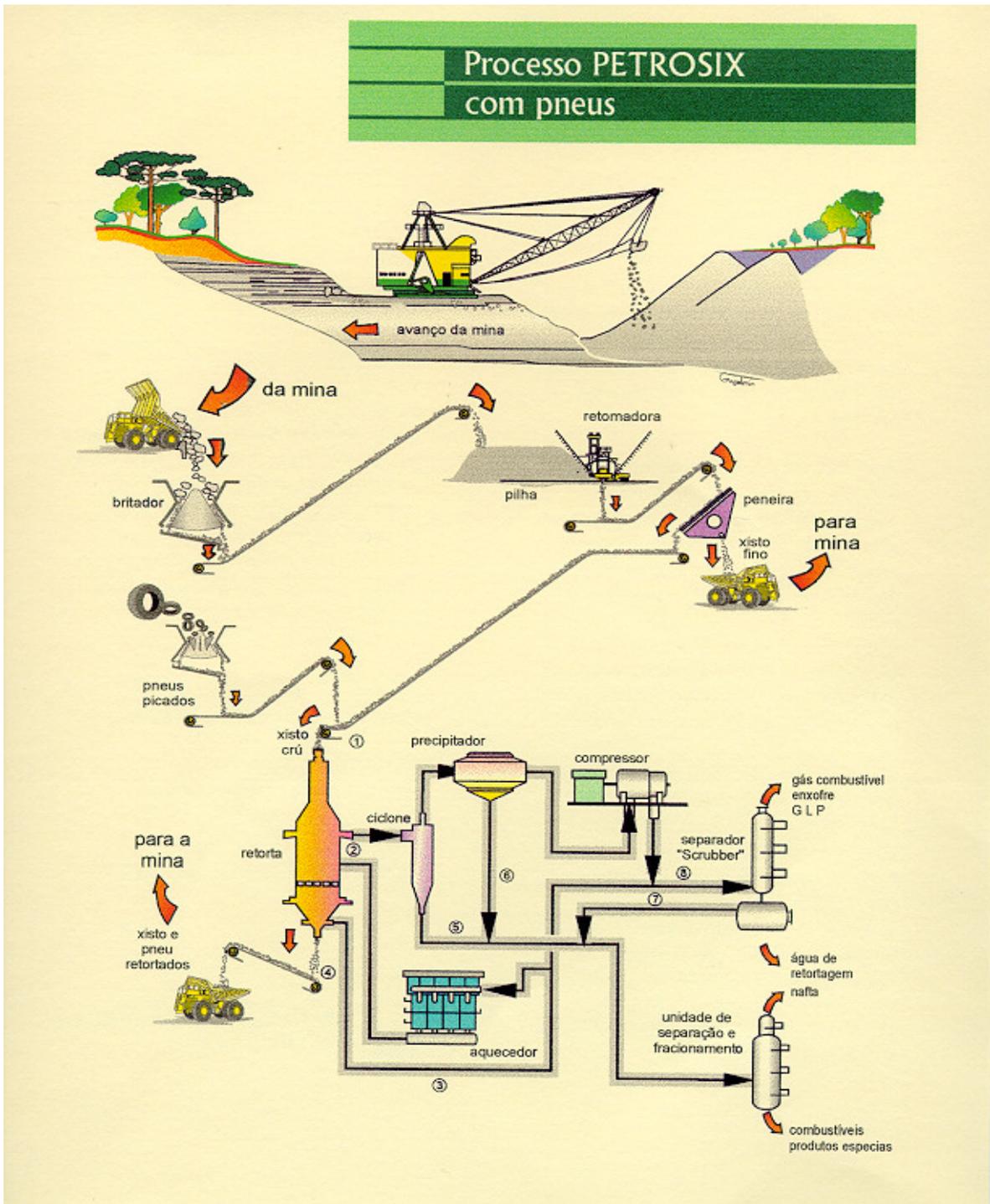


Figura 12 – Processo Petrosix Fonte – Michelin (2000)

## CAPÍTULO 5

### DISCUSSÃO DAS ALTERNATIVAS

Nos capítulos anteriores foram apresentadas diversas alternativas para o reaproveitamento de pneus inservíveis, como fonte de energia, ou como matéria-prima, de modo a atender a Resolução CONAMA 258/99, que define regras para o reaproveitamento de pneus inservíveis, responsabilizando por isso os fabricantes. Foi discutida ao longo da dissertação a relação existente entre estas alternativas e os 4 R's, ou seja, Redução, Reutilização, Reciclagem e Recuperação Energética.

#### - Redução

Dos 4 R's, a redução é a mais importante visto que, se trata efetivamente de reduzir os resíduos dispostos, e quando este resíduo é o pneu, a importância torna-se ainda maior. É discutido na dissertação o empenho que as indústrias fabricantes de pneumáticos estão fazendo para que ocorra esta redução.

Parece um pouco paradoxal, pois é quase incompreensível que uma indústria tenha como meta fabricar menos produtos ao longo do tempo. Porém, o que se observa é que existe uma componente importante neste contexto, que se chama concorrência. A cada dia, o concorrente produz pneus com maior vida útil, ou seja, que consegue uma maior quilometragem. A consequência desta ação é uma maior durabilidade do pneu e, por conseguinte menor necessidade de fabricação.

Um segundo ponto importante que os fabricantes estão trabalhando é em produzir um pneu que possibilite uma maior quantidade de reformas possíveis, principalmente nos pneus de carga. Hoje já existem dimensões de pneus que podem ser reformados 2 ou até 3 vezes, dependendo das condições de utilização, ou seja, das estradas e do cuidado do próprio usuário. Para se ter uma idéia desta dimensão, nos Estados Unidos, o país em primeiro lugar em número de reformas no mundo, são reformados, cerca de 15 milhões de pneus a cada ano. O Brasil é o segundo maior país em reformas de pneus com aproximadamente 8 milhões de pneus por ano. Isto se reproduz em fabricar menos 8 milhões de pneus novos por ano. Além das duas alternativas anteriores, surge agora uma nova alternativa que é a substituição dos pneus geminados por um único pneu, com aproximadamente 70% do somatório do peso dos 2 pneus geminados. Se um pneu de carga pesa em torno de 60 kg, 2 pneus geminados pesam 120kg que ao serem substituídos por 1 de 95 kg, geram uma redução de 25 kg de resíduo a cada 2 pneus geminados ou 200kg a cada carreta completa.

## - Reutilização

A reutilização é uma alternativa extremamente interessante, em função de que não é preciso se investir muito para tal. Isto se torna uma grande vantagem, pois neste caso o pneu é praticamente reutilizado em sua forma original, com pequenas intervenções.

A mais importante alternativa de reutilização é o pneu-solo, onde os mesmos podem ser reutilizados inteiros ou cortando-se apenas uma de suas laterais. O pneu, em função de seus constituintes, tem uma elevada resistência à tensões radiais e isto é fundamental para este tipo de reutilização. Outras vantagens importantes são o aumento da resistência do solo, onde estes pneus são reutilizados, a redução da vibração e a baixa degradabilidade com o tempo. O principal problema desta alternativa é o aparecimento de materiais para a contenção de encostas, de preço relativamente baixo e de fácil aquisição, como as mantas de polietileno e grades de arame. Para se ter uma dimensão da quantidade de pneus necessários para esta alternativa, numa encosta de 300 metros de comprimento por 4 metros de altura consome em torno de 63.500 pneus de passeio, o que significa em torno de 508 toneladas. Sua utilização é assim dependente da quantidade de encostas necessárias. No Rio de Janeiro há um teste, de contenção de encostas, em andamento, na favela Rio das Pedras.

Uma alternativa ainda pouco explorada no Brasil é a do Tapete-Pneu, onde se reutilizam principalmente as bandas de rodagens de pneus inservíveis como material antivibratório. É uma técnica que pode ser utilizada para reduzir as vibrações nas bases dos trilhos das linhas ferroviárias e em locais onde existem máquinas vibratórias. Porém no Brasil é uma alternativa pouco difundida, pois reutilizando somente a banda de rodagem, teria muito pouca aceitação.

A drenagem de biogás em aterros sanitários também pode ser uma alternativa interessante, visto que existe uma formação importante de biogás na decomposição do lixo. Todavia alguns inconvenientes como a umidade, a fermentação e bloqueio do próprio lixo, podem ocasionar rompimentos dos drenos, além é claro de surgimento de materiais alternativos a preços atraentes, que podem substituir o pneu.

Uma técnica que surge e que pode ser viável no Brasil é a reutilização de pneus inservíveis como recifes artificiais. No Brasil, onde a faixa litorânea é imensa, esta alternativa pode melhorar o desenvolvimento da fauna marinha naquele local além de evitar erosões nas costas devidas a correntes marinhas. Apesar de ainda polêmico, pois estaríamos colocando “lixo” no mar, um piloto está sendo desenvolvido em Angra dos Reis, litoral do estado do Rio de Janeiro.

Ainda existem outras técnicas como a reutilização em peças agrícolas, solo para a prática de judô, solados de sapato, artefatos para parques infantis, proteção para pistas de kart, treinamento de cavalos, ancoradouros de barco, porém em escalas muito inexpressivas atualmente.

#### - Reciclagem

A reciclagem de pneus inservíveis é a terceira das alternativas e, diferentemente de todas as outras, citadas anteriormente, está relacionada a uma transformação importante prévia destes pneus. A reciclagem pode ser como borracha triturada ou borracha regenerada. Como borracha triturada, os pneus inservíveis devem ser submetidos a vários processos de corte, picagem e trituração antes de serem reciclados.

Uma utilização muito importante que se encontra, ainda em ensaios no Brasil, é a reciclagem de pneus inservíveis, como borracha triturada em misturas de asfalto. Existem alguns trechos de rodovias federais, como num trecho experimental na BR 116, no Rio Grande do Sul, que já receberam o concreto asfáltico modificado com borracha, na proporção de 12 a 15% em peso, pelo processo via úmida. Este trecho está sendo monitorado para uma avaliação mais consistente. Esta alternativa traz alguns benefícios para o asfalto, sendo os mais importantes, a resistência à fadiga e rachaduras e aumento da vida útil.

Ela vem ao encontro da situação brasileira. O Brasil, um país continental, essencialmente baseado em transporte rodoviário, tem aproximadamente 1,7 milhões de quilômetros em estradas, das quais somente 165 mil quilômetros são asfaltados, estradas estas, em sua maioria, em péssimas condições de tráfego. Esta alternativa torna-se extremamente importante, viabilizando a reciclagem de pneus como borracha triturada misturada ao asfalto.

Uma segunda utilização da borracha triturada proveniente de pneus inservíveis é como participante na mistura com argila para melhoria da impermeabilidade desta, em relação a percolados de hidrocarbonetos. Com o aumento da frota de veículos no mundo, houve necessidade de aumento do número de postos de gasolina e com isto, o risco de um acidente por vazamento dos tanques de combustível se tornou mais iminente. Há uma estimativa que, somente nos Estados Unidos, existam hoje 600 mil tanques enterrados que estão contaminando o solo. A borracha por se tratar de um composto apolar tem mais afinidade por hidrocarbonetos do que a argila, que tem uma polaridade maior. Com isso, a argila que é reconhecidamente um material impermeável, tem a performance reduzida quando o percolado é um hidrocarboneto. A borracha triturada, misturada e posteriormente compactada em uma proporção de 10% em peso com a argila, aumenta o tempo de percolação

de um hidrocarboneto, em função da absorção do mesmo pela própria borracha, e com isso favorece a contenção de um possível vazamento de gasolina, por exemplo em tanques enterrados. É uma alternativa que ainda se encontra em análise, apesar dos resultados, em laboratórios, serem satisfatórios. O grande problema é a preparação da borracha e posteriormente a preparação da mistura com argila.

Uma outra alternativa de reciclagem de pneus inservíveis é como borracha regenerada. Da mesma forma que as demais alternativas de reciclagem, a borracha regenerada também apresenta a desvantagem da preparação prévia dos pneus inservíveis, além do que as propriedades da borracha regenerada são inferiores a da borracha virgem, o que restringe, em muito, sua utilização. Todavia é uma alternativa que procura substituir a borracha virgem por uma borracha regenerada, o que já torna simpática a idéia do produto ser reciclado dentro do próprio produto.

#### - Recuperação Energética

O 4º R refere-se à Recuperação Energética. Nesta alternativa, os pneus inservíveis, em função do seu alto poder calorífico, são utilizados como combustíveis, em vários processos industriais como siderúrgicas, incineração de lixo, centrais elétricas a carvão, cimenteiras e em pirólise. Estes pneus podem substituir perfeitamente o carvão na proporção de 1:1.

No Brasil, as indústrias siderúrgicas e as centrais elétricas ainda não utilizam em escala industrial os pneus inservíveis como combustível, visto que necessitam de algumas modificações em seus processos.

Em alguns casos, como das cimenteiras, além de combustível, os pneus inservíveis também entram como parte da matéria-prima no processo. Contudo, somente parte das indústrias cimenteiras, investiu em modificações do processo industrial e hoje co-processam pneus em algumas de suas plantas industriais. A grande vantagem desta alternativa é que além da economia de combustível, cerca de 15% de carvão, o monitoramento adequado garante uma qualidade do ar dentro das normas. O resíduo deste processo é nulo, ou seja, todo o pneu é convertido em energia ou é agregado ao clínquer do cimento.

É importante ainda ressaltar duas outras vantagens importantes: a quase nenhuma transformação dos pneus inservíveis antes da utilização dos mesmos no processo, e a grande capacidade de consumo destes pneus no Brasil. Estima-se que atualmente o Brasil tem a capacidade potencial de co-processar aproximadamente 1,4 milhões de toneladas de pneus inservíveis por ano. Se considerarmos que a produção anual de pneus em 2001, cerca de 41,3 milhões de unidades, ou aproximadamente 560 mil toneladas, em peso, só os fornos

de cimento poderiam co-processar toda a produção e mais 1 ano e meio de passivo ambiental de pneus inservíveis. Todavia, neste mesmo ano, apenas 160 mil toneladas de pneus inservíveis foram co-processadas. Isto, porque muitas indústrias cimenteiras ainda não co-processam o pneu, seja porque ainda estão em fase de iniciação desta alternativa, seja porque tentam se aproveitar da Resolução CONAMA 258/99 passando a cobrar preços muito acima daquele que o mercado suporta.

A última alternativa proposta nesta dissertação é a da pirólise em usinas de xisto, que hoje ocorre, no estado do Paraná. Esta alternativa surgiu com a necessidade de reaproveitamento do pneu inservível. Projetada primeiramente para processar somente o xisto, a PETROSIX teve sua estratégia alterada em função dos graves problemas ambientais surgidos com o descarte de pneus de forma inadequada, e com a divulgação da Resolução CONAMA 258/99. A partir de 2001, a Petrobrás passou a incorporar ao xisto betuminoso 15 % de pneus inservíveis, criando então mais uma alternativa interessante do ponto de vista ambiental, visto que além de destruir o pneu inservível, a Petrosix com esta mistura, produz negro de carbono e enxofre, matérias-primas para a fabricação dos próprios pneus, além de óleo combustível, GLP, nafta e outros combustíveis. Estima-se que a Unidade de Negócios da Petrobrás – PETROSIX tenha a capacidade de pirolisar aproximadamente 140 mil toneladas de pneus inservíveis por ano, o que pode significar, em torno de 25% de toda a produção atual de pneus no Brasil. Outra vantagem importante desta alternativa é que o resíduo deste processo, chamado de xisto e pneus retortados é reconduzido às cavas das minas onde é recoberto com argila e solo vegetal, de forma ambientalmente segura.

Esta dissertação tem como objetivo mostrar algumas das alternativas atualmente disponíveis para o reaproveitamento de pneus inservíveis no Brasil. Porém é evidente que somente as **técnicas de recuperação energética**, seriam capazes de cumprir, com uma certa folga, a Resolução CONAMA 258/99. No entanto, isto só seria possível se todas as indústrias cimenteiras passarem a co-processar, em 100% de suas plantas, pneus inservíveis. A própria Resolução CONAMA fez com que as indústrias cimenteiras passassem a cobrar valores mais elevados às indústrias pneumáticas, para co-processarem os pneus inservíveis, freando momentaneamente este processo.

É importante ressaltar que, no reaproveitamento de pneus, os fabricantes não têm vantagens diretas sobre este processo, pois os derivados do reaproveitamento de pneus não são utilizados na fabricação de produtos novos. Isto é uma responsabilidade exclusivamente ambiental. Por não agregar valor econômico ao pneu, mas com a obrigatoriedade do cumprimento da Resolução CONAMA 258, os fabricantes deveriam, em parceria com as universidades, incentivar a pesquisa de novas alternativas de

reaproveitamento de pneus inservíveis. O grande trabalho, neste caso, reside no desenvolvimento de outras indústrias que possam reaproveitar pneus ou parte dos seus componentes. Os fretes de coleta podem ser altos se visualizarmos a extensão do território nacional, e as empresas fabricantes de pneus, através da ANIP, procuram um equilíbrio econômico nesta atividade, buscando parceiros ao menor custo e outras aplicações que valorizem o pneu.

Por tudo isto, este trabalho quer mostrar que todas as alternativas assumem tanta importância quanto às de recuperação energética. Um exemplo disto é a alternativa de mistura de borracha triturada em asfalto, que encontra uma demanda fenomenal no Brasil, visto que mais de um milhão de quilômetros de estradas não são asfaltadas e as que são necessitarão continuamente de manutenção, ou seja, uma demanda infinita.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÃO

A primeira conclusão importante desta dissertação é que a Resolução CONAMA 258/99 foi fundamental para que a questão dos pneus inservíveis, no Brasil, tomasse um outro rumo, a qual se mostra, de certa forma, tranquilizadora em relação aos problemas causados por estes pneus ao meio ambiente, em função do engajamento dos fabricantes de pneus, em conjunto com a ANIP (Associação Nacional das Indústrias de Pneumáticos).

Todavia é interessante que haja uma parceria entre o Estado, através dos órgãos ambientais, e os fabricantes de pneus, através da ANIP, a fim de se elaborar uma campanha publicitária para conscientizar a população sobre as várias possibilidades de reaproveitamento dos pneus inservíveis, mostrando os malefícios que este produto pode causar ao meio ambiente e à saúde. Esta campanha deveria mostrar também a responsabilidade de todos, em relação a este assunto; do fabricante, o primeiro responsável por seu produto, do berço ao túmulo, e da população em geral, sensibilizando-a quanto às boas práticas com relação aos pneus inservíveis, como por exemplo, não guardar pneus descobertos, deixar os pneus trocados nos próprios revendedores, entregar pneus inservíveis em pontos de coleta, não queimar pneus e por fim não jogar os pneus em rios, lagos e terrenos baldios.

Outra conclusão é que o pneu inservível, apesar de ser considerado inerte, trata-se de um resíduo sólido inflamável e muito complexo, tanto em relação à sua composição química quanto do ponto de vista logístico, pois os mesmos são encontrados espalhados em todo território nacional, o que dificulta muito uma implantação de uma infraestrutura eficaz de coleta e de transporte destes pneus. Isto se deve, principalmente devido à grande extensão do território brasileiro, aliado a existência restrita de pontos de reaproveitamento, geralmente concentrados nos grandes pólos industriais do sudeste e do sul do Brasil.

A dissertação é o ponto de partida para uma discussão mais ampla em relação às alternativas atuais de reaproveitamento de pneus inservíveis. Todas elas, sem exceção, são extremamente importantes e pertinentes. Devem ser realizadas de maneira coordenada, de forma a permitir a competitividade entre elas, tornando-as econômicas e viáveis. Certamente,

esta competição trará benefícios em relação aos custos e à rapidez do reaproveitamento de pneus.

É fato que, a Redução dos resíduos é a maneira mais adequada de gerenciamento sustentável. Quando se vê a preocupação dos fabricantes em aumentar a vida útil de um pneu, em substituir os pneus geminados e mesmo a possibilitar mais reformas destes pneus, conclui-se que, pelo menos neste segmento, a estratégia de ação está ambientalmente correta. Talvez, haja ainda a necessidade, por parte do Estado, da implementação de políticas de incentivos fiscais e logísticos, fiscalização ostensiva e campanhas educativas para sedimentar este gerenciamento e perenizá-lo ao longo do tempo.

A Reutilização de pneus, como *Pneu-Solo*, *Tapete Pneu*, *Drenagem de Biogás* e *Recifes Artificiais* são alternativas importantes que devem ser destacadas, uma vez que não demandam custos extras, que seriam necessários para uma transformação prévia destes pneus.

A Reciclagem de pneus, como a *Borracha Triturada* e a *Regeneração da Borracha*, são também alternativas, que mesmo havendo a necessidade de uma transformação prévia dos pneus inservíveis, têm importância, em especial no Brasil. No caso da Borracha Triturada existem algumas possibilidades, como Fabricação de Solos Esportivos, Melhoria da Impermeabilidade de Solos Argilosos na Percolação de Hidrocarbonetos e Revestimento de Estradas e Calçadas. Esta última alternativa, a borracha triturada misturada ao asfalto, que se encontra em testes no sul do país, vem se mostrando uma possibilidade viável, tanto tecnicamente como estrategicamente, visto que, no Brasil, existe um déficit de rodovias asfaltadas.

Na questão do reaproveitamento de pneus inservíveis, os fabricantes devem incentivar a pesquisa em universidades, para que possam desenvolver novas alternativas que tornem este processo ainda mais viável economicamente. Desta forma, busca-se agregar valor econômico aos pneus inservíveis, reduzir os custos dos processos de reaproveitamento e ir além da tão somente responsabilidade ambiental, atualmente praticada por estes fabricantes de pneus.

Entretanto, fica bastante evidente que as alternativas de recuperação energética são, sem nenhuma dúvida, as mais pertinentes no momento, para o nosso país. Atualmente, o co-processamento de pneus em fornos de cimenteiras e a pirólise destes, em mistura com o xisto, já se encontram em andamento em diversas unidades de produção no país. Tais processos possuem ainda dois aspectos importantíssimos sobre as demais alternativas, sendo estas; a baixíssima necessidade prévia da preparação dos pneus aos referidos processos e a grande capacidade de queima existente, para o reaproveitamento destes pneus inservíveis, nos mesmos.

A conclusão final é que somente as técnicas de recuperação energética poderiam atualmente cumprir, com uma certa tranquilidade, à Resolução CONAMA 258/99. Contudo, como esta possibilidade não é viável no momento, uma vez que nem todas as cimenteiras já co-processam pneus inservíveis, todas as outras alternativas tornam-se importantíssimas no contexto atual. Finalmente, é fundamental que se encontre uma sistemática factível para a questão da coleta e do transporte destes pneus, do local onde quer que eles estejam até os locais de reaproveitamento dos mesmos.

## **ANEXO 1**

### **RESOLUÇÃO CONAMA N.º 258, de 26 de agosto de 1999**

"Obriga as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção definida nesta Resolução relativamente às quantidades fabricadas e/ou importadas."

O CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, no uso das atribuições que lhe são conferidas pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto n.º 99.274, de 6 de junho de 1990 e suas alterações, tendo em vista o disposto em seu Regimento Interno, e

Considerando que os pneumáticos inservíveis abandonados ou dispostos inadequadamente constituem passivo ambiental, que resulta em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública;

Considerando que não há possibilidade de reaproveitamento desses pneumáticos inservíveis para uso veicular e nem para processos de reforma, tais como recapagem, recauchutagem e remoldagem;

Considerando que uma parte dos pneumáticos novos, depois de usados, pode ser utilizada como matéria prima em processos de reciclagem;

Considerando a necessidade de dar destinação final, de forma ambientalmente adequada e segura, aos pneumáticos inservíveis, resolve:

Art. 1º - As empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção definida nesta Resolução relativamente às quantidades fabricadas e/ou importadas.

Parágrafo único - As empresas que realizam processos de reforma ou de destinação final ambientalmente adequada de pneumáticos ficam dispensadas de atender ao

disposto neste artigo, exclusivamente no que se refere a utilização dos quantitativos de pneumáticos coletados no território nacional.

Art. 2º - Para os fins do disposto nesta Resolução, considera-se:

I - Pneu ou pneumático: todo artefato inflável, constituído basicamente por borracha e materiais de reforço utilizados para rodagem em veículos;

II - Pneu ou pneumático novo: aquele que nunca foi utilizado para rodagem sob qualquer forma, enquadrando-se, para efeito de importação, no código 4011 da Tarifa Externa Comum - TEC;

III - Pneu ou pneumático reformado: todo pneumático que foi submetido a algum tipo de processo industrial com o fim específico de aumentar sua vida útil de rodagem em meios de transporte, tais como recapagem, recauchutagem ou remoldagem, enquadrando-se, para efeitos de importação, no código 4012.10 da Tarifa Externa Comum-TEC;

IV - Pneu ou pneumático inservível: aquele que não mais se presta a processo de reforma que permita condição de rodagem adicional.

Art. 3º - Os prazos e quantidades para coleta e destinação final, de forma ambientalmente adequada, dos pneumáticos inservíveis de que trata esta Resolução, são os seguintes:

I - A partir de 1º de janeiro de 2002: para cada quatro pneus novos fabricados no País ou pneus importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível;

II - A partir de 1º de janeiro de 2003: para cada dois pneus novos fabricados no País ou pneus importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível;

III - A partir de 1º de janeiro de 2004:

a) Para cada um pneu novo fabricado no País ou pneu novo importado, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível;

b) Para cada quatro pneus reformados importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão dar destinação final a cinco pneus inservíveis.

IV - A partir de 1º de janeiro de 2005:

a) Para cada quatro pneus novos fabricados no País ou pneus novos importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a cinco pneus inservíveis.

b) Para cada três pneus reformados importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão dar destinação final a quatro pneus inservíveis.

Parágrafo único - O disposto neste artigo não se aplica aos pneumáticos exportados ou aos que equipam veículos exportados pelo País.

Art. 4º - No quinto ano de vigência desta Resolução, o CONAMA, após avaliação a ser procedida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, reavaliará as normas e procedimentos estabelecidos nesta Resolução.

Art. 5º - O IBAMA poderá adotar, para efeito de fiscalização e controle, a equivalência em peso dos pneumáticos inservíveis.

Art. 6º - As empresas importadoras deverão, a partir de 1º de janeiro de 2002, comprovar junto ao IBAMA, previamente aos embarques no exterior, a destinação final, de forma ambientalmente adequada, das quantidades de pneus inservíveis estabelecidas no art. 3º desta Resolução, correspondentes às quantidades a serem importadas, para efeitos de liberação de importação junto ao Departamento de Operações de Comércio Exterior-DECEX, do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior.

Art. 7º - As empresas fabricantes de pneumáticos deverão, a partir de 1º de janeiro de 2002, comprovar junto ao IBAMA, anualmente, a destinação final, de forma ambientalmente adequada, das quantidades de pneus inservíveis estabelecidas no art. 3º desta Resolução, correspondentes às quantidades fabricadas.

Art. 8º - Os fabricantes e os importadores de pneumáticos poderão efetuar a destinação final, de forma ambientalmente adequada, dos pneus inservíveis de sua responsabilidade, em instalações próprias ou mediante contratação de serviços especializados de terceiros.

Parágrafo único - As instalações para o processamento de pneus inservíveis e a destinação final deverão atender ao disposto na legislação ambiental em vigor, inclusive no que se refere ao licenciamento ambiental.

Art. 9º - A partir da data de publicação desta Resolução fica proibida a destinação final inadequada de pneumáticos inservíveis, tais como a disposição em aterros sanitários, mar, rios, lagos ou riachos, terrenos baldios ou alagadiços, e queima a céu aberto.

Art. 10 - Os fabricantes e os importadores poderão criar centrais de recepção de pneus inservíveis, a serem localizadas e instaladas de acordo com as normas ambientais e demais normas vigentes, para armazenamento temporário e posterior destinação final ambientalmente segura e adequada.

Art. 11 - Os distribuidores, os revendedores e os consumidores finais de pneus, em articulação com os fabricantes, importadores e Poder Público, deverão colaborar na adoção de procedimentos, visando implementar a coleta dos pneus inservíveis existentes no País.

Art. 12 - O não cumprimento do disposto nesta Resolução implicará as sanções estabelecidas na Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, regulamentada pelo Decreto nº 3.179, de 21 de setembro de 1999.

Art. 13 - Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

JOSÉ SARNEY FILHO  
Presidente do Conselho

JOSÉ CARLOS CARVALHO  
Secretário Executivo

(Of. nº 1.802/99)

(D.O. 02/12/99)

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMON, J.J. et Al – “Pneus Usagés Non Reutilisables” – Michelin. France, 2001.

AMBIENTE BRASIL – Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br>> Acesso em: 06 Ago. 2002.

ANDERSON, D.C.; BROWN, K.W.; THOMAS, J.C. “Conductivity of compacted clays soils to water and organics liquids”. Waste Management and Research, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM225 - Critérios mínimos de seleção de pneus para reforma e reparação. Inspeção e identificação. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11175 – Incineração de resíduos sólidos perigosos - Padrões de desempenho. Rio de Janeiro, 1990.

BAYKAL, G.; ALPATLI, H.M. Permeability of rubber-soil liners under confinement. Bogazici University. Istanbul, 2000.

BLUMENTAHL, M. Scrap tire market development: the impact of state programs. Resource Recycling, 1998.

COLLINS, K.; “Littoral Sense” – Tire Technology International – University of Southampton – United Kingdom, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução 235. Brasília, 1998.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução 258. Brasília, 1999.

CORSEUIL, H.X.; SANTOS, R.P.; FERNANDES, M. Contaminação de aquíferos por derramamentos de gasolina e álcool. Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental. Porto Alegre, 1996.

CUNHA LIMA, L.C.O.; HEMAIS, C.A. Borracha Regenerada, uma nova abordagem do assunto. Revista de Química Industrial n.º 710/711, 1997.

ELZEDIN, A.S.; VACCARI, D.A.; MUELLER, R.T. “Fly ash concrete containing petroleum contaminated soils”. Proceedings, 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. Istanbul, 1992.

DNER. Banco de Dados. Disponível em: <<http://www.dner.gov.br>> Brasília, Acesso em: 20 Jul. 2002.

- GERSCOVICH, D. et al.- Reuso de pneus em geotecnia. Seminário Nacional sobre Reuso /Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais – FIESP. São Paulo, 2000.
- HAUSMANN, M.R. “Slope Remediation”. Stability and Performance of Slope and Embankments-II, Geotechnical Special Publication n°31, ASCE, 1990.
- HOLCIN BRASIL S/A. Plano de Controle Ambiental de Co-Processamento de Pneus. Pedro Leopoldo, 1998.
- HOLDERBANK NEWS. St Lawrence Cement awarded the energia prize, 1996.
- IPT/CEMPRE. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. 2ª Ed. São Paulo, 2000.
- LEITE, L.F.M. et al. Mechanical behavior of asphalt rubber mixes prepared in laboratory. In: Asphalt Rubber 2000, Portugal, 2000.
- LONG, N.T. “Pneusol, Tyresoil, Tiresoil”. Colloque Routes et Développement, École National des Ponts et Chaussées, France, 1984.
- MASDOUMIER, C. Récupération des pneus usagés . Memoire de Maitrise L.E.A, Université Blaise Pascal. Clermont-Ferrand, 1994.
- MICHELIN PNEUMÁTICOS LTDA. Palestra sobre situação de reciclagem de pneus no Brasil e no mundo. Rio de Janeiro, 2000.
- MICHELIN RECAPAGE. Módulo de formação para reformas de pneus. Rio de Janeiro, 2001.
- MITCHELL, J.K.; MADSEN, F.T. “Chemical effects on clay hydraulic conductivity”, Geotechnical Practice for Waste Disposal. Geotechnical Special Publication n°13, ASCE, 1987.
- MORILHA JR, A.; DANTAS, G.A.; BARROS, R.M.V. Aplicações práticas de ligante asfáltico modificado por borrachas de pneus de alta viscosidade. 11ª Reunião de Pavimentação Urbana. Porto Alegre, 2002.
- OLIVER, J.W.H. Rutting and fatigue properties of crumbed rubber hot mix asphalts. In: Asphalt Rubber 2000, Portugal, 2000.
- ROSENHOJ, J.A. The cement kiln. The optimal solution for waste tyre burning. Belgium, 1993.