

Reciclagem de Polímeros: Questões Sócio-ambientais em Relação ao Desenvolvimento de Produtos

Polymer Recycling: Socio-Environmental Issues in Relation to Development of Product Design

Cerqueira, Vicente - Doutor em Ciência e Tecnologia de Polímeros
Universidade Federal do Rio de Janeiro
vcerqueira@ufrj.br

Resumo

A partir de uma contextualização histórica, observar-se que os conceitos de reutilização e reciclagem já eram praticados na manufatura de produtos. O objetivo geral deste trabalho é discutir os preceitos da sustentabilidade em relação às ações projetivas e produtivas nas tecnologias de polímeros – plásticos e borrachas. São discutidos conceitos pertinentes aos fatores de produção e que se relacionam às técnicas de reciclagem. Como conclusão, indica-se proposições baseadas no sistema projeto/processo/produto que contribuem com programas internos e externos de reciclagem de polímeros.

Palavras-chaves: Sustentabilidade; Reciclagem de polímeros; Projeto de Produtos

Abstract

From a historical context, noted that the concepts of reuse and recycling were practiced in the manufacture of products. The objective of this paper is to discuss the principles of sustainability in relation to shares in technology projects and products of polymers - plastics and rubbers. Concepts discussed are relevant to the factors of production and that relate to recycling techniques. In conclusion, it lists propositions based on the system design/process/product that contribute to internal and external programs for recycling of polymers.

Keywords: Sustainability; recycling of polymers; Product Design

1. Introdução

A utilização de resíduos, sucatas ou mesmo produtos descartados não chega a ser um fato novo para a dinâmica produtiva. É possível se perceber que, antes mesmo da industrialização, já ocorria práticas que empregavam este recurso para produzir materiais que, mais tarde, seriam transformados em novos produtos. A utilização desses recursos derivava-se da escassez de matérias-primas e das dificuldades técnicas para beneficiamento. De modo geral, a transição da manufatura artesanal para a industrial ocasionou produções dispendiosas e descontínuas, resultando em produtos de qualidade inferior e que eram descartados rapidamente, ou seja, a manufatura pré-industrial era limitada e com a industrialização houve o aumento dos recursos produtivos decorrente da produção em larga escala de novos produtos.

Com o desenvolvimento científico ocorrido no final do século XIX houve a expansão do modelo de produção industrial, fazendo crescer a produção de artefatos vertiginosamente. Esse aumento ocasionou a expansão de oferta dos recursos produtivos básicos, isto é, matérias-primas, geração de energia, água e mão-de-obra, o que possibilitou a expansão da atividade industrial por meio de novas técnicas (entre eles os polímeros) e métodos de produção resultando na melhoria da qualidade técnica dos produtos.

Logo, se de um lado a racionalização dos processos reduziria as perdas e desperdícios do outro ocasionaria a expansão da oferta, através do aumento da capacidade instalada e o aumento por demanda de materiais, energia entre outros insumos. A escassez de recursos no modelo produtivo pré-industrial encontra-se na carência de conhecimento, enquanto que no modelo industrial a escassez de recursos é gerada pela produção e consumo indiscriminado. Percebe-se, então, que a resposta tecnológica para os problemas da atividade produtiva foi mais rápida e eficiente se comparado aos problemas sócio-ambientais, levando após cem anos de produção industrial intensa a um quase esgotamento dos recursos naturais e a exclusão social. Por esse aspecto, o problema da relação produtiva com as questões sócio-ambientais, não se limita aos aspectos tecnológicos ou econômicos, mas na maneira como são organizadas suas pertinências em relação ao desenvolvimento humano.

Portanto, o objetivo deste trabalho é discutir a sustentabilidade em relação às ações projetivas e produtivas nas tecnologias de polímeros – plásticos e borrachas. Para tal, define-se, neste artigo, um estudo sobre a área de polímeros (plásticos e borrachas) como exemplo de ações capazes de constituírem programas com índices significativos de sustentabilidade ambiental, social e econômica, principalmente, ao se observar o cenário brasileiro. Para tal, justifica-se o estudo, a partir de temas relacionados à sustentabilidade, tais como: cadeia produtiva, inovação sócio-ambiental, Funções “Rs”, gestão ambiental, entre outros para em seguida caracterizá-los em relação às tecnologias de manufatura de produtos plásticos e borrachas. Finalizando o artigo, se reafirma a importância da educação sócio-ambiental a partir dos conceitos apresentados, tendo como prerrogativa a prática projetiva em produtos.

2. Sustentabilidade Produtiva

De modo geral, os sistemas produtivos correspondem ao fenômeno sócio-econômico que cria mercadorias para trocas financeiras, tendo como fundamento básico a agregação de valores, por meio da transformação de recursos naturais em produtos ou serviços. Neste sentido, percebe-se que a tecnologia é fruto da capacidade intelectual do homem em relação às condicionantes ambientais. Todavia, a condição tecnológica foi se modificando, seguindo caminhos próprios e se distanciando do desenvolvimento social.

Partindo dessa premissa, todos os programas tecnológicos merecem reflexões sobre as práticas produtivas, onde a percepção dos recursos ambientais corresponde ao fator indispensável para a produção de bens manufaturados. Logo, recursos como **matérias-**

primas, energia e água são recursos que ao final do século passado entraram na fase crítica de exploração, requisitando novos procedimentos para suas aplicações e usos. Essas considerações, não têm o intuito de resgatar a relação primária do fazer técnico, mas mostrar as interações desses recursos nos diversos segmentos produtivos e suas interferências na vida contemporânea, onde tecnologia, economia e sociedade deverão manter-se em sinergia com as relações ambientais.

A Comissão Brundtland (2002), observou que, em pouco mais de um século de produção industrial, houve quase esgotamento dos recursos materiais, em decorrência do consumo excessivo de diversos recursos naturais para a manufatura de produtos. Além do esgotamento, o crescimento industrial submeteu o meio ambiente a outro problema – a poluição – decorrente da grande quantidade de resíduos provenientes dos processamentos e do pós-uso. Como exemplo, cita-se que, em 2003, cerca de 130 mil toneladas de lixo urbano foram depositados em aterros sanitários ou em “lixões” nos principais centros urbanos brasileiros, dos quais, aproximadamente, 48% são materiais são passíveis de reciclagem, sendo que o percentual de plásticos e correlatos fica em 12% dessa totalidade. A mistura de materiais orgânicos e industrializados corresponde, ao principal problema ambiental das grandes cidades, isto porque, não existem de maneira consistente programas de educação ambiental e de coletas seletivas. Para Guimarães (2008), as iniciativas se limitam em atender às exigências legais ou vocações de grupos sociais, salientando que a falta de políticas públicas voltadas à educação ambiental é o principal problema para a questão do lixo urbano.

Mano *et al* destaca que a geração e consumo de energia é desperdiçada, seja ela oriunda de recursos hídricos, nuclear, petrolífera ou mesmo de fontes complementares. Esse desperdício remete a questões de oferta e demanda, pois cerca de 70% da produção da energia mundial, concentra-se em apenas cinco regiões do planeta. Ainda neste contexto, verifica-se que parcela significativa da produção e consumo de energia gerada no mundo é destinada ao transporte de pessoas e cargas. Logo, se os processos produtivos remetem direta ou indiretamente ao conceito de poluição e os processos geradores de energia ocasionam um efeito mais abrangente e capaz de alterar, de modo irreversível, o meio ambiente próximo e afastado, resultando em impactos ambientais.

A água é outro recurso natural indispensável para os processos produtivos. O planeta possui uma superfície coberta por 95% de água, apenas 5% deste total é referente à água doce e pouco mais da metade encontra-se em estado líquido. Porém, estima-se que, aproximadamente, $\frac{1}{4}$ de toda água doce do mundo esta com algum tipo de contaminação, requisitando, cada vez mais, investimentos em sistemas de tratamentos para adequá-la ao consumo doméstico e/ou industrial. A maioria dos processos produtivos utiliza volumes consideráveis de água, normalmente aplicado para refrigeração de máquinas e equipamentos. Neste caso, grande parte da água utilizada é tratada *in house* e reutilizadas no próprio processo produtivo ou aplicadas em outros setores da organização. Já outros processos, tais como a produção de celulose e papel, utilizam grande volume de água para beneficiamento e produção que, após seu uso, necessita de cuidados especiais, devido à contaminação.

2.1 Inovação Sócio-ambiental

As inovações são caracterizadas em níveis de impacto técnico-econômico em: inovações incrementais, substanciais e radicais (Forte & Kaplan, 2003); e categorizadas em: inovações tecnológicas, inovações estruturais e inovações comerciais. Cerqueira & Hemais (2004), observaram que todas as formas de inovações solicitam desdobramentos internos e/ou externos à organização, gerando ou implementando outras inovações. Entretanto, atualmente, ocorre uma quarta categoria de inovação e que remete às questões de integração homem-meio-objeto, tendo como finalidade o estabelecimento de parâmetros para o desenvolvimento

social. Esta nova categoria é denominada de **inovação social** e visa agregar, ou mesmo, modificar determinados padrões por meio de novos conceitos de relacionamento produtivo,

Deste modo, as inovações sociais apresentam-se como instrumento de alto valor social, capaz de estimular não só o uso, mas também, a agregação e participação de produtores e usuários em torno de uma idéia. Este conceito não se limita às tecnologias regionais ou de baixa complexidade, é aplicado, também, em situações de alto conteúdo tecnológico, capaz de gerarem bem-estar mediante a formação de redes sociais (Manzini, 2008). Por esse aspecto, há a necessidade de reconhecimento de valores éticos em todas as nuances que compõem a sociedade, principalmente, no que tange a integração de programas de P&D à responsabilidade social e aos sistemas de gestão ambiental, visando à constituição de inovações sócio-sustentáveis.

2.2 Sistema de Gestão Ambiental - SGA

De todas as iniciativas regulatórias, talvez aquela que mais contribuiu com a responsabilidade ambiental foram procedimentos indicados pela *International Organization for Standardization* – ISO, por meio da Série 14000, mais especificamente, as orientações 14001 para a elaboração do Sistema de Gestão Ambiental-SGA. Este sistema vem se constituindo em importante instrumento para empresas adequarem seus processos produtivos a parâmetros ambientais. Integrando-se a estratégia central das empresas o SGA contribui com resultados positivos, inclusive, em seus aspectos comerciais, no qual estabelece processo contínuo e evolutivo na agenda tecnológica. Entretanto, a implantação do SGA não é garantia de melhoria no desempenho ambiental, pois uma empresa poderá adequar-se à norma simplesmente padronizando o modelo de gerenciamento e assumir como corretos procedimentos tradicionais, de baixo desempenho ambiental, sem qualquer abordagem evolutiva da produção limpa. Por esse motivo, o SGA deverá ter rotinas abertas e dispostas às novas proposições, em sinergia com outros programas internos e externos da empresa, objetivando a hiper-eficiência produtiva através da eliminação de desperdício, economia energética, redução de insumos, eliminação de agentes, entre outros aspectos, conforme mencionado por Manzini & Vezzoli (2002).

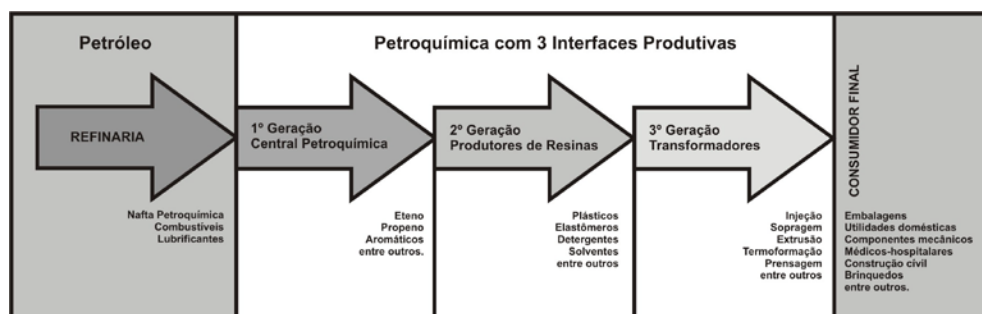
Apesar disto, Seiffert (2005) comenta sobre a necessidade de conciliação das esferas tecnológica, econômica e ambiental para uma contextualização mais abrangente em relação ao desenvolvimento social destacando a necessidade de regulamentações legislativas, mesmo que parcialmente. Por sua vez Guimarães *et al* (2008) comenta que a legislação brasileira apesar de ampla, ainda não apresenta amplitude significativa em relação às questões produtivas e meio ambientes (ciclo de vida, produção limpa, eficiência energética etc), se limitando aos parâmetros sobre tratamentos de resíduos.

2.3 Cadeias Produtivas

O conceito de cadeia produtiva corresponde a um sistema de inter-relacionamento empresarial tendo como função associar ativos através da agregação de valores em produtos ou serviços, constituindo um sistema de produção interligada. Arnold (1999) e Slack *et al* (1999) comentam que as relações produtivas formam vínculos estratégicos e encontram-se baseadas em sistemas de suprimentos, correspondendo ao fluxo de produtos e serviços – oferta; e um contra-fluxo de projetos e informações – demanda, onde nenhuma operação existe isoladamente e todas fazem parte de um ambiente maior, interconectadas entre fornecedores e clientes, constituindo a idéia de rede de suprimento (*supply network*). Além dessas características, as estruturas produtivas estabelecem interações diretas e indiretas, possibilitando observar perspectivas a médio e longo prazos. Por sua vez, Chopra & Meindl (2001), comentam que a visão gerencial tem papel significativo nos arranjos produtivos, pois

permitem uma ampla visão das forças que alteram o cenário existente, tais como: atividades paralelas ou periféricas (*outsourcing*).

Observa-se que uma análise baseada na sustentabilidade não se limita às interações existentes no escopo produtivo linear, seqüencial, hierárquica ou mesmo na relação de compra e venda. Há, na realidade, outras condicionantes que indicarão se a estrutura produtiva apresenta uma relação sustentável em termos ambientais, tecnológicos econômicos e sociais. A análise das relações sócio-ambientais estará consubstanciada tanto no modo específico dos processos (micro-sistêmico), quanto em âmbito geral (macro-sistêmico), considerando as estruturas produtivas sobre a ótica de rede, isto é, em níveis de geração produtiva e suas atividades paralelas (*outsourcing*), e não simplesmente, na análise sobre as relações ecológicas do produto, mas em todas as etapas e interações do processo produtivo. A figura abaixo mostra a cadeia produtiva de polímeros a partir das gerações e produtos.



Fonte: Cerqueira & Hemais (2004)

Fig. 1- Representação da cadeia produtiva de polímeros

2.4 As Funções "Rs"

Entre os principais aspectos que corroboram com programas de sustentabilidade sócio-ambiental, estão as funções "Rs" que, gradativamente, vem contribuindo para relações produtivas menos agressivas ao meio ambiente e que possibilitam ganhos para uma produção mais limpa. No entanto, não há consenso sobre as especificidades das funções "Rs" quando aplicados em programas ambientais. Mano *et al* (2005) indicam apenas três funções: Reduzir, Reutilizar e Reciclar como aquelas mais importantes na constituição de programas ambientais. Já outros autores incluem as funções Reintegrar, Regenerar, Repensar e Recusar.

As funções Repensar e Recusar ainda não são prioritárias em programas ambientais, pois dependem de outros aspectos para serem implementadas, sem com isso gerar novos problemas, principalmente, aqueles relacionados ao desenvolvimento sócio-econômico. Enquanto, as funções Reintegrar e Regenerar apresentam controversas quanto à sua aplicação, mas são aceitas dentro das funções "Rs". Uma das controversas refere-se à reintegração de determinados agentes ou materiais à natureza, que poderão ocasionar danos a médio-longo prazos em decorrência da saturação no meio onde foram descartados, além de sujeitar o ambiente à poluição até que o produto esteja completamente integrado (degradado) à natureza. Já a função Regenerar corresponde à reciclagem terciária, pois visa recuperar as propriedades básicas de determinado material. Outro aspecto que merece destaque refere-se ao uso genérico da função Reciclar para designar as outras funções "Rs", é necessário se observar as finalidades específicas de cada função, pois estará condicionada a determinados recursos ou procedimentos.

3. Tecnologia de Polímeros

As tecnologias de transformação de polímeros – plásticos ou borrachas – formam o grupo mais expressivo na fabricação de produtos industrializados. Segundo dados da OMC

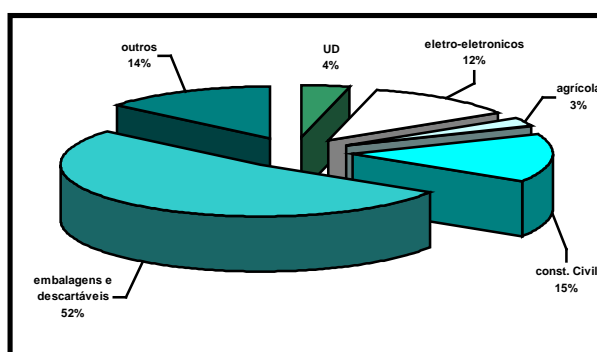
(2006), a quantidade de plásticos transformados já ultrapassa a transformação do aço. Esta demanda deve-se as suas propriedades, aos custos de fabricação, a logística empregada e as possibilidades em design. Para os elastômeros (borrachas), não se têm dados consolidados referentes à sua transformação, mas considerando a produção automotiva nas últimas décadas, percebe-se que houve grande demanda, pois os principais produtos fabricados com esses materiais são pneumáticos, em torno de 40% e calçados, com 26%¹.

Os materiais poliméricos são substâncias macromoleculares, de origem orgânica, obtidos pela repetição de moléculas menores (meros) que formam cadeias mediante ações físicas ou químicas. De acordo com a estrutura do polímero ele poderá apresentar comportamento mecânico em plástico, em elástico ou em fibra. Sua estrutura, também, define as propriedades tecnológicas em termoplástico ou termorrígido. Além dessas classificações, existem outras que estão relacionadas às características físico-químicas ou ao seu desempenho, conforme mostrado a seguir pela classificação técnico-econômica²:

- Polímeros Comuns (*commodities*)- grupo de maior abrangência; alta produção e baixo custo, tais como Polipropileno-PP, poliestireno-PS e Poli(cloreto de vinila) – PVC;
- Polímeros (*pseudo-commodities*)- grupo de polímeros de uso específico, produção relativa à demanda, médio custo, tais como: policarbonato-PC, poliamida-PA, poli(metacrilato de metila)-PMMA, Polioximetileno-POM, entre outros;
- Polímeros (*specialties*)- grupo de polímeros de alto desempenho, apresentando baixa produção e alto custo, tais como: poli(éter-cetona)-PEK, poli-imida-PI, entre outros.

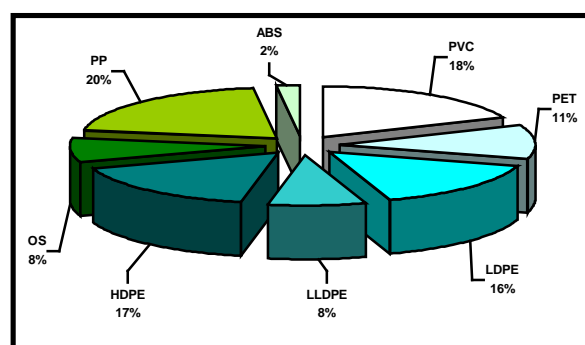
3.1 Processamentos de polímeros plásticos

As tecnologias de transformação de polímeros plásticos formam um leque expressivo para a produção de produtos. Essa abrangência é resultado do alto índice de investimentos tecnológicos na cadeia produtiva e no próprio aperfeiçoamento dos plásticos, donde se caracteriza: a redução do custo da produção, a alta produtividade, baixo consumo de energia e insumos básicos, baixo peso molecular (leveza), fácil coloração, variedade de acabamento, possibilidade de formas complexas entre outros. Contudo, algumas dessas vantagens se reverterem quando não se tem programas consistentes para o desenvolvimento de processos e produtos. Os gráficos abaixo (Figuras. 2 e 3) mostram como se distribui o cenário produtivo de plásticos no Brasil.



Fonte: ABIPLAST (2004)

Fig. 2 - Principais segmentos de mercado em transformação de plásticos



Fonte: ABIPLAST (2004)

Fig. 3- Segmentação dos principais plásticos consumidos no Brasil

Salienta-se que, nas últimas décadas, a ciência e a tecnologia de plásticos tem evoluído consideravelmente, e Brasil tem acompanhado esta evolução produzindo, aproximadamente,

4.500 mil ton./aa. de termoplásticos, 300 mil ton./aa. de termorrígidos colocando-se como um dos principais *players* do cenário mundial. Porém, esta evolução não significa aumento da variedade de plásticos, mas sim sua redução em decorrência de novos *grades* e de composições que possibilitaram maior abrangência de mercado e, por conseguinte, facilitaram a identificação para reciclagem. Portanto, pode-se dizer que, a partir da última década, os polímeros entraram em uma fase de “amadurecimento” tecnológico, isto é, menos variedade com mais amplitude de processabilidade

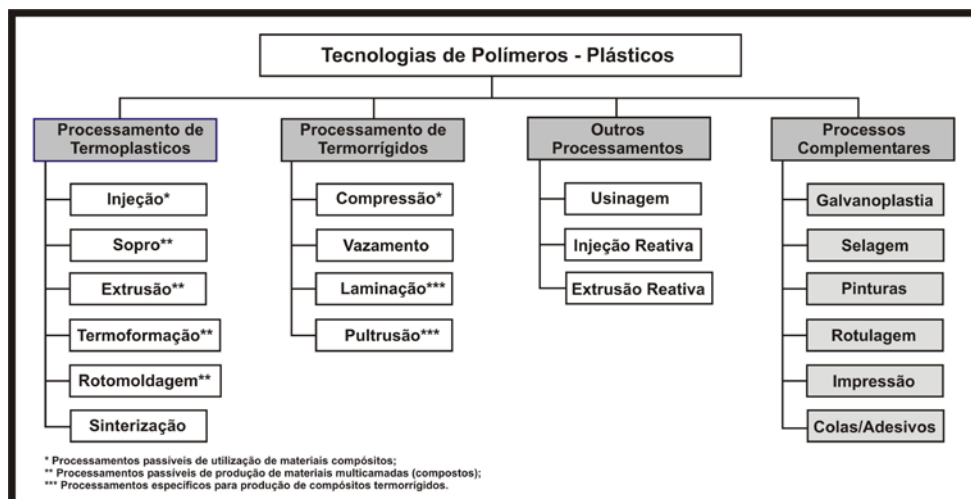
3.1.1 Transformação de Termoplásticos

Além da diversidade de materiais plásticos, verifica-se uma quantidade significativa de processos e técnicas de transformação, que possibilitam a produção de peças grandes ou pequenas dimensões, em grande escala ou limitadas, com altos ou baixos investimentos. Os produtos termoplásticos apresentam vantagens, se comparado com outros processos de manufatura. Vários fatores e aspectos processuais contribuem para esta dinâmica, dos quais se destacam a redução de diversos insumos, ocasionando alta rentabilidade. Além disso, as variações tecnológicas existentes permitem adequar os parâmetros processuais às características formais e mecânicas dos produtos. No entanto, em decorrência do processo ocorrerão resíduos de primários (matérias-primas) ou ainda a incidência de perdas de insumos básicos (energia, água, etc.) caso a tecnologia não esteja compatibilizada adequadamente com as características do produto, como por exemplo, a tecnologia de injeção poderá gerar uma perda de 02% a 08% do material processado, já a termoformação gera uma quantidade maior podendo variar de 05% a 12% do material processado.

Os resíduos de processos (canais de injeção, aparas, refugos, etc.) retornam à linha de produção. Todavia, a energia consumida não tem retorno. Por esse aspecto, salienta-se a importância da tecnologia de projeto para dimensionar os parâmetros de máquinas e a adequação dos moldes e matrizes a fim de melhorar o desempenho da produção, com o máximo de eficiência com o menor consumo de insumos produtivos.

3.1.2 Transformação de Termorrígidos

Os materiais termorrígidos correspondem aos primeiros polímeros obtidos artificialmente. A característica mais marcante desse grupo de plásticos é a alta dureza e a resistência térmica. Parte significativa dos termorrígidos é processada utilizando cargas minerais como material reforçante, tais como: fibras, talcos, ou até mesmo resíduos plásticos, resultando em um compósito de matriz polimérica. Esses plásticos apresentam número menor de processamentos, porém sua conformação incorre em índices significativos de perdas de insumos, em decorrência do excesso de mão-de-obra e da carência de recursos técnicos mais sofisticados. Outro aspecto verificado na transformação de termorrígidos é a durabilidade técnica-funcional, ou seja, enquanto os produtos em termoplásticos possuem ciclo de vida curto ou médio, os produtos conformados com termorrígidos apresentam ciclo de vida longo, em decorrência de suas propriedades físicas e químicas. A indicação dos termorrígidos deve ser bem analisada nos projetos, pois apresentam uma série de problema de ordem ambiental, em decorrência dos resíduos industriais gerados e da durabilidade de detritos e refugos quando depositados no ambiente. Portanto, essas tecnologias devem ser aplicadas em produtos que terão ciclo de vida longo. A Figura 4 mostra de modo simplificado, os principais grupos tecnológicos relacionados à transformação de plásticos.

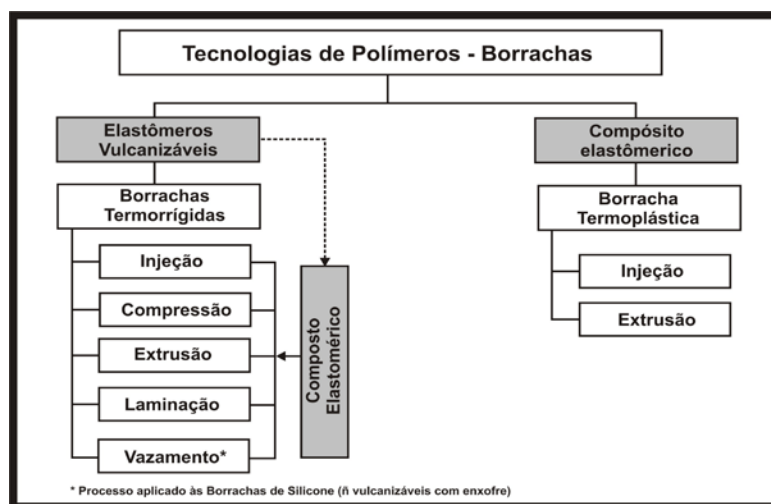


Fonte: Elaboração própria (2007)

Fig. 4 – Principais sistema produtivo em tecnologias de plásticos

3.2 Processamentos de elastômeros (borrachas)

Ao contrário das tecnologias de plásticos, as tecnologias de transformação de elastômeros apresentam especificidades que poderão dificultar sua reciclagem, isto porque, os elastômeros necessitam de composição (mistura elastomérica) para que sejam processados e compatibilizados às propriedades inerentes ao produto. As tecnologias de borrachas não apresentam muitas variações tecnológicas, conforme pode ser verificado na Figura 5, mas as combinações entre os elastômeros e as substâncias aplicadas na composição da borracha apresentam grandes variações, pois está relacionada diretamente a geometria, a aplicação do produto e tipo de tecnologia empregada.

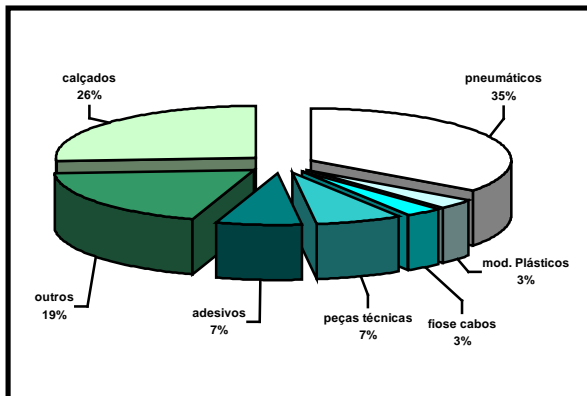


Fonte: Elaboração própria (2007)

Fig. 5 – principais sistemas produtivos em polímeros elásticos (borrachas)

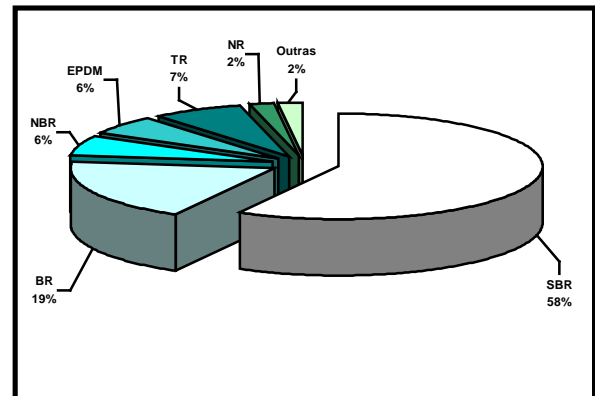
Geralmente, os elastômeros são obtidos na condição termoplástica, e quando submetidos à vulcanização adquirem comportamento termorrígido, isto é, passam a ter estabilidade dimensional, devido ao uso de ação térmica e agentes vulcanizantes (peróxidos orgânicos ou enxofre-S), aumentando, assim, o número de interações entre as cadeias poliméricas (*cross-links*) conferindo-lhes maior elasticidade, estabilidade e resistência às ações térmicas e a solventes. É comum, também, na mistura elastomérica o uso de material

reforçante (fibras, tecidos, fios e enxertos) a fim de melhorar o desempenho dos produtos. Por esse aspecto, a maneira mais apropriada para a reciclagem é agrupar os refugos e rejeitos de borrachas por grupos funcionais. A maioria dos elastômeros, tais como: polibutadieno-BR, copolímero(butadieno-estireno)-SBR, poliisopreno-IIR, são vulcanizados por enxofre, já outros elastômeros como o poli(dimetil-siloxano)-MQ e o copolímero(etileno-propeno-dieno)-EPDM são vulcanizados utilizando peróxidos. A variação de uso e aplicações dos elastômeros não é muito grande, conforme pode ser verificado pelos gráficos de segmentação do mercado de borrachas no Brasil (Figuras 6 e 7)



Fonte: Borracha atual, ano VI, Nº 32 – Jan/Fev, 2004

Fig. 6 – Principais segmentos de mercado de borrachas



Fonte: Borracha atual, ano VI, Nº 32 – Jan/Fev, 20

Fig. 7 – Segmentação das principais borrachas consumidas no Brasil

A partir da década 80 iniciou-se a produção de borrachas termoplásticas, tendo como finalidade a redução de resíduos provenientes do processo produtivo e facilitar a reciclagem dos mesmos. A borracha termoplástica corresponde a um composto polimérico formado por matriz elastomérica e a fase dispersa plástica. A presença do polímero plástico na mistura confere características termoplásticas à borracha, mas acarreta perda na elasticidade do material. As borrachas termoplásticas podem ser processadas utilizando técnicas semelhantes aos plásticos, contudo sua aplicação ainda é limitada, devido, em parte, às suas propriedades e ao alto custo.

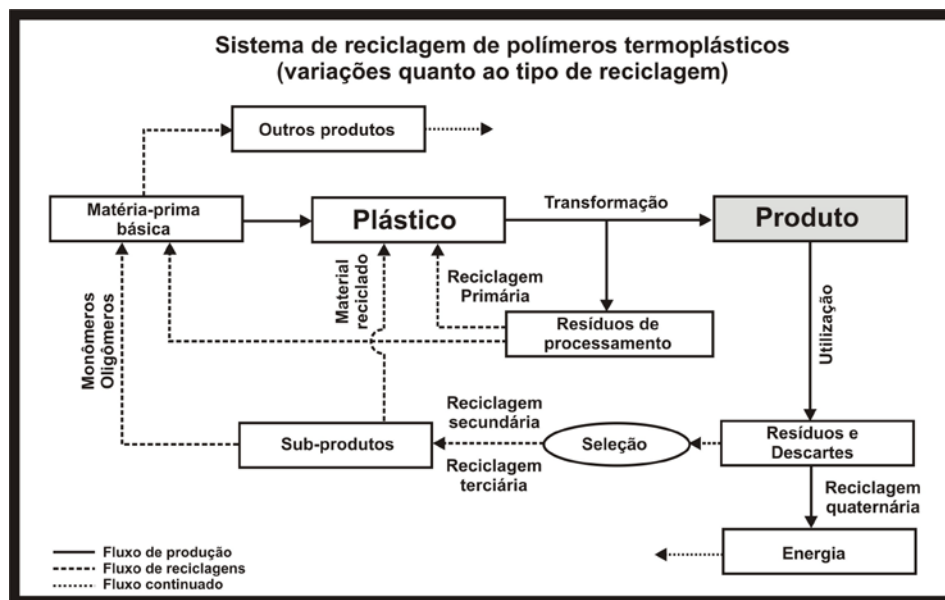
4. Reciclagem de Polímeros

De certo modo, os polímeros, sejam eles plásticos ou borrachas, figuram na mídia como uma espécie de vilões ambientais. A primeira crítica refere-se à derivação do petróleo e à produção de gases formadores do efeito estufa. Entretanto, os polímeros consomem a menor parte do refino de petróleo. Apenas 04% do craqueamento correspondem à nafta, substância destinada à produção de matérias-primas básicas. Em sua cadeia produtiva verificam-se os menores índices de consumo de recursos básicos se comparados a outras tecnologias. Além disso, os polímeros formam um grupo de materiais que, historicamente, surgiram para substituir outros materiais que consumiam muitos recursos ou incorriam na produção de grande quantidade de resíduos, isso sem mencionar que os primeiros polímeros foram criados para substituir materiais naturais, tais como: o casco da tartaruga e o marfim.

Existem, porém, aspectos de ordem sócio-econômica que dificultam práticas relacionadas à reciclagem desses materiais, tais sejam: o preço da matéria-prima virgem é extremamente competitivo; a ausência de sistema eficiente de coleta e limpeza urbana; e a relação físico-econômica (peso x volume = ganho financeiro) do material todos esses aspectos desestimulam a participação coletiva e individual, restringindo o volume de material

reciclado. Outro ponto refere-se à estrutura físico-química dos polímeros em relação a sua processabilidade, pois após processados apresentam diminuição de peso molecular (M_w) decorrente das taxas de cisalhamento. Quando aplicada a reciclagem, principalmente a mecânica, o peso molecular diminui ainda mais, solicitando a incorporação de material “virgem” e/ou aditivos, a fim de recuperar as propriedades intrínsecas dos plásticos.

O setor de reciclagem de plásticos vem apresentando taxas de crescimento de 09%/aa., processando aproximadamente 800 ton./aa, equivalente a 18,3% da produção brasileira de termoplásticos e o mais interessante é o aumento da reciclagem pós-consumo, apresentando índice de 57,6%/aa. de todo material reciclado (Fonte: Plastvida, 2006). O segmento de elastômeros apresenta a taxa de 13,6% (Fonte: Borracha Atual, 2006), sendo que, grande parte, destina-se a reciclagem energética. Entretanto, esses números poderiam ser maiores se houvesse programas consistentes de educação ambiental que conscientizassem e estimulassem a participação coletiva e individual em ações de desenvolvimento sustentável, tendo como prerrogativa ações voltadas à reciclagem de polímeros. A Figura 8 mostra o fluxo empregado para sistemas de reciclagens em termoplásticos, a partir das principais etapas de produção



Fonte: adaptado de Mano *et Al* (2005)

Fig. 8 – Sistema de reciclagem de polímeros plásticos

A *Environmental Protection Agency/USA* define reciclagem como “a coleta, processamento, comercialização e uso dos materiais considerados lixo”. Logo, a reciclagem consiste em uma tecnologia que possibilita a recuperação de materiais a partir de rejeitos industriais ou derivados de pós-consumo. Diversos fatores incentivam a reciclagem de polímeros. No entanto, seus principais focos são: a necessidade de poupar e preservar os recursos naturais; minimizar resíduos provenientes de processamentos em relação ao ambiente; proporcionar a integração entre os diversos setores sociais visando à conscientização sobre a responsabilidade sobre os problemas ambientais, produtivos e econômicos. Os sistemas de reciclagem de polímeros são classificados em níveis operacionais, a partir do modo como são gerados e tratados os resíduos sólidos, tais sejam:

- **Reciclagem primária**- resíduos provenientes da linha de produção (canais de injeção, aparas, cortes e peças danificadas). A reciclagem primária, ou *in house*, ocorre no interior da empresa, sendo a forma mais simples e de menor custo;

- **Reciclagem secundária**- utiliza diversos tipos de resíduos. Esses resíduos são provenientes do lixo ou coletores individuais, por esse aspecto é mais dispendioso, pois necessita de seleção e limpeza antes de iniciar o processo propriamente dito. A reciclagem secundária gera materiais sob a forma de flocos ou grãos;
- **Reciclagem terciária**- emprega resíduos tendo como finalidade produzir subprodutos. Para isso submete os polímeros a reações químicas, obtendo assim, a “quebra” das ligações que formam as cadeias, formando oligômeros ou retornando à condição inicial de monômeros. A reciclagem terciária é conhecida como reciclagem química;
- **Reciclagem quaternária**- emprega resíduos de diversas origens, inclusive com mistura de plásticos e borrachas, pois tem como objetivo recuperar a energia contida nesses materiais por meio da combustão.

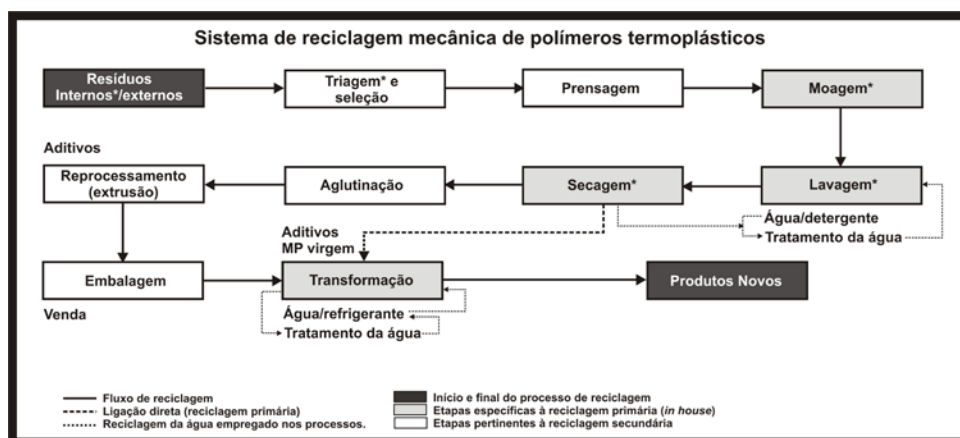
4.2 Técnicas de Reciclagem de polímeros

Ao contrário de outros materiais de engenharia, os polímeros apresentam variações tecnológicas para reciclagem. Os polímeros necessitam de atividades de pré-reciclagem, principalmente, se esses resíduos forem provenientes de lixos. Cada tipo de reciclagem de polímeros se destina a um grupo, classe ou mesmo características poliméricas. Os processos de reciclagem são compatibilizados com as propriedades, composição, origem entre outros aspectos, por esse motivo estão divididas em três tecnologias, tais sejam: reciclagem mecânica, reciclagem química e reciclagem energética.

4.2.1 Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica é a mais difundida nos meios produtivos, pois não necessita de muita tecnologia para implementá-la. Esta técnica consiste na seleção e limpeza de resíduos termoplásticos provenientes da produção ou de material descartados (lixos); em seguida o material é submetido à trituração, produzindo flocos; os flocos são lavados, secos e depois submetidos a uma extrusora para produção dos grãos (*palets*) do material. O granulado poderá ser misturado com materiais novos do mesmo tipo para ser novamente processados.

A reciclagem mecânica é mais empregada tanto para plásticos termoplásticos, mas também poderá ser empregada para borrachas, dependendo da sua composição. Esta reciclagem atuará em nível primário (*in house*), como também, em nível secundário, a partir de empresas recicladoras. A Figura 9 mostra o fluxo de atividades necessárias para a realização da reciclagem mecânica nos níveis primário e secundário.



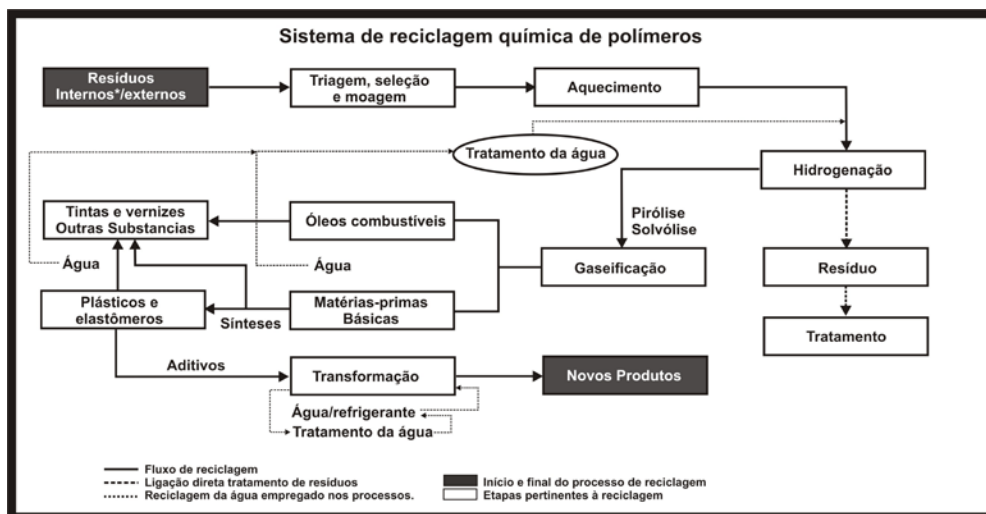
Fonte: elaboração própria (2008)

Fig. 9 – Fluxo de atividades para reciclagem mecânica de plásticos (primária e secundária)

4.2.2 Reciclagem Química

A reciclagem química requer maior controle no processo, pois emprega reações químicas durante as operações de reciclagem. Esta técnica consiste em submeter o polímero a solvólise – degradação por solvente; a pirólise – degradação por aquecimento controlado; ou a processos termoxidativos – degradação implementada por aquecimento e oxigênio. Essas técnicas possibilitam a redução da cadeia polimérica em pequenas parcelas (oligômeros) ou na condição inicial de monômero. No caso da obtenção de monômeros poderá haver a síntese de novos polímeros com propriedades semelhantes aos originários ou em caso de oligômeros plásticos serão transformados em subprodutos para produção de tintas e/ou vernizes. Contudo, apenas o poli(tereftalato de etileno)-PET, derivado de garrafas, tem apresentado resultados comerciais interessantes neste tipo de reciclagem para produção de fibras poliéster.

“A reciclagem química é mais adequada a tipos complexos de resíduos plásticos, que ainda não dispõem de tecnologia de reciclagem adequada” (Mano *et al*, 2007:127), por esse motivo seu uso ainda está restrito a algumas empresas que se especializam neste tipo de reciclagem e se destinam a produção de fios e fibras têxteis ou materiais de uso específicos. Esta técnica vem sendo aperfeiçoada, justamente para atender as demandas de plásticos termorrígidos e borrachas vulcanizadas, pois apresenta resultados interessantes do ponto de vista da regeneração de materiais. No entanto, são processos que possuem custos, relativamente altos, devido à sua sofisticação, assim como necessitam de reagentes químicos para implementá-las. A Figura 10 mostra a sequência operacional para a reciclagem química.



Fonte: Elaboração própria (2008)

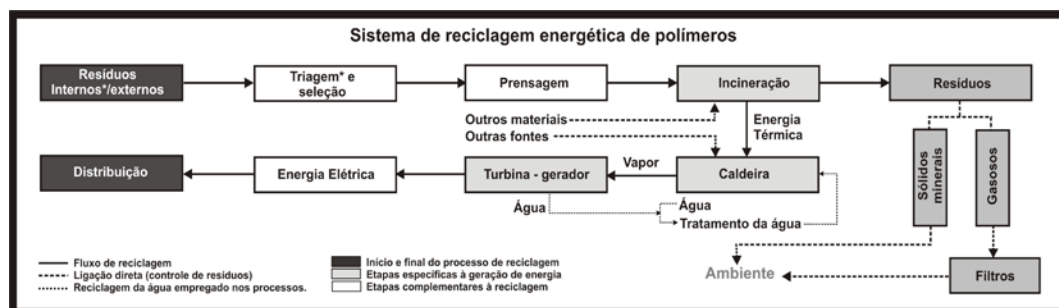
Fig. 10- Fluxo de atividade para reciclagem química (terciária)

4.2.3 Reciclagem Energética

A reciclagem energética não está bem conceituada como um processo de reciclagem, propriamente dito, mas sim como reutilização, haja vista que não há retorno ao ciclo de produção idêntico ou semelhante ao que originou o polimérico. Na realidade a reciclagem energética, consiste em aproveitar os resíduos poliméricos sólidos para gerar energia a partir da combustão. Este tipo de reciclagem é aconselhado para resíduos complexos (termorrígidos, borrachas e compósitos) ou que necessitem de cuidados especiais (descartáveis médico-hospitalares, embalagens de óleos, etc.), sendo considerada como uma reciclagem quaternária.

Os polímeros, principalmente as borrachas, apresentam alto teor calorífero (18.000 BTUs/Kg), quando empregado misturados a outros resíduos orgânicos ou associados a outras substâncias combustíveis este índice aumenta ainda mais. Entretanto, salienta-se que este tipo

de reciclagem poderá gerar outros problemas de ordem ambiental, caso não haja um controle da emissão gases provenientes da queima. Os resíduos sólidos oriundos da queima poderão ser misturados ao solo sem ocasionar danos ambientais, conforme demonstrado na Figura 11. A utilização dos polímeros nesta tecnologia dependerá de abastecimento constante, isto é, volume de materiais, para tornarem-se economicamente viáveis.



Fonte: Elaboração própria (2008)

Fig. 11- Fluxo de atividade para reciclagem energética (quaternária)

4.3 Ações para a Reciclagem de Polímeros

A reciclagem de polímeros dependerá de algumas considerações técnicas, principalmente, sobre seu comportamento mecânico e sua característica básica em termoplásticos ou termorrígidos. Geralmente, os produtos manufaturados em polímeros chegam ao final de sua vida funcional, mantendo as propriedades físico-químicas, por esse motivo é necessário identificar de algum modo esses materiais para que possam ser reciclados devidamente. No caso dos materiais plásticos a ABNT, seguindo orientações internacionais, padronizou os pictogramas, utilizando a cor vermelha, para identificação dos principais termoplásticos (Figura 12). No caso de borrachas, a ABNT não faz menção, entretanto, pode-se empregar a simbologia de reciclagem, indicando abaixo do pictograma o tipo de borracha. Em situações onde fica impossível a identificação do termoplástico, sugere-se que a reciclagem esteja vinculada à produção de madeira plástica.



Fonte: adaptado de Mano et Al (2005)

Fig. 12 – Simbologia para indicação de grupos plásticos visando à reciclagem

4.3.1 Plásticos

Grande parte das técnicas de reciclagem se destina aos termoplásticos, em decorrência do volume produzido e transformado. Para a reciclagem de termorrígidos dependerá não só do volume, como também, de sua composição, haja vista que, número significativo dessas resinas é processado sob a forma de compósito. Para termoplásticos se aplica a reciclagem mecânica primária ou secundária, em certos casos a reciclagem química e de modo específico a reciclagem energética. Enquanto, para os termorrígidos os processos de reciclagem mais empregados são a reciclagem química e a energética, em decorrência de suas propriedades físico-químicas. Abaixo, apresentam-se alguns exemplos de produtos provenientes de materiais reciclados, Figura 13- Reciclagem primária (*in house*); Figura 14, reciclagem

secundária derivada de lixo; e Figura 15- Reciclagem secundária derivada de cooperativas de catadores.



Fig.13- Utilidades domésticas



Fig. 14- Madeira plástica



Fig. 15- Fibras e cerdas para vassouras

4.3.2 Elastômeros

As borrachas adotam os mesmos princípios da reciclagem de plásticos, ou seja, podem utilizar a reciclagem mecânica, a química e a energética. A diferença mais significativa relaciona-se à reciclagem mecânica que, normalmente, ocorre no nível secundário e destina-se a misturas elastoméricas ou com outros materiais. A maioria das borrachas emprega a reciclagem química quando o produto não se encontra muito deteriorado, dando origem a novos elastômeros ou a diversos subprodutos. A reciclagem quaternária (energética) é bastante utilizada, em decorrência dos valores caloríferos provenientes da queima das borrachas. As imagens ilustram algumas aplicações das borrachas recicladas, tais como: Figura 16 produto a partir da reciclagem mecânica primária; Figura 17 utilização da reciclagem química para regeneração da borracha; e Figura 18 reciclagem mecânica secundária.

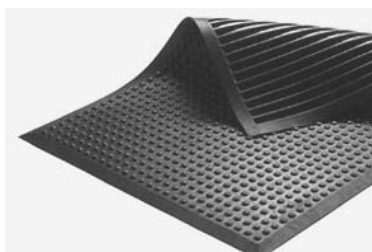


Fig. 16- Tapete de borracha - SBR



Fig. 17- bolsas com reforço de algodão

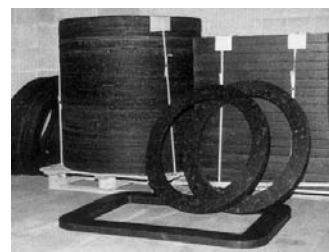


Fig. 18- Vedantes para caixa de acesso

5. Comentários Finais

De acordo com observado durante a pesquisa, há consenso em dois aspectos de extrema relevância para práticas sustentáveis, o estabelecimento de programas de educação ambiental e de reciclagem de recursos produtivos. A educação ambiental corresponde ao caminho para se estabelecer uma sociedade mais responsável e comprometida com os valores ecológicos e sociais, visando o pleno desenvolvimento das atividades humanas e a reciclagem é o principal fator para que haja integração dessas atividades, através da compreensão sobre os recursos naturais renováveis e não renováveis e suas relações com o desenvolvimento tecnológico e econômico. Ainda, na seara da reciclagem verifica-se no Brasil que este fato tecnológico possibilita a inserção de camadas sociais no cenário econômico, como uma alternativa de geração de trabalho e renda.

No campo da atividade produtiva empresarial, percebe-se que programas de relacionamento com o meio ambiente ainda são limitados, porém existe um cenário favorável

para investimentos nesta área, principalmente em setores que apresentam altos índices de produtividade como o de polímeros. As atividades de desenvolvimento de produtos, sejam elas de caráter operacional ou de inovação, devem considerar como ponto fundamental a adequação de soluções projetivas às práticas de reciclagem, a partir das seguintes proposições:

- Redução de componentes mecânicos; Eliminar excesso e/ou desperdício com matéria-prima, energia e outros insumos;
- Utilização de poucas tecnologias na fabricação; Economizar insumos e facilitar a separação de materiais;
- Utilização de materiais com compatibilidade técnica; Evitar desgaste prematuro de peças e componentes mecânicos e suas substituições;
- Seleção de materiais que apresentem facilidade de reciclagem; Facilitar logística e infra-estrutura para reciclagem;
- Identificação de materiais por meio de pictogramas ou outros recursos; Selecionar materiais na pós-produção ou no pós-consumo;
- Normalização e procedimentos técnicos; Certificar atividades produtivas, (processos e produtos) a partir de conceitos da ISO 14000;
- Adoção de critérios para inclusão social, ambiental e tecnológica; Incentivar a produção de tecnologias abertas
- Elaboração de planos de incentivos ao retorno de produtos; programas de trocas, substituições ou reposições de produtos (logística inversa);
- Educação ambiental e inserção social a partir de princípios éticos; Elaborar procedimentos junto a grupos sociais visando o bem estar social; entre outros.

6. Referências Bibliográficas

1. CAETANO, G.; ASHLEY, P.; GIANANTI, R. **Responsabilidade Social e Meio Ambiente**. São Paulo: Saraiva 2007.
2. CERQUEIRA, V.; HEMAIS, C. **Indústria brasileira de transformação de plásticos e suas estratégias tecnológicas**. X ALTEC. Ciudad del México, CD-Rom, 2003.
3. CHOPRA, S.; MEINDL, P. *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation*. Boston: Prentice Hall, 2001.
4. FOSTER, R.; KAPLAN, S. **Destruição criativa**. São Paulo: Campus, 2002.
5. JOVCHELOVITCH, N. **Parcerias e alianças estratégicas: uma abordagem prática de gestão e sustentabilidade**. São Paulo: Global, 2002.
6. KNIGHT, A.; HARRINGTON, J. **A implementação da ISO 14000: Como atualizar o sistema de gestão ambiental com eficácia**. São Paulo: Atlas, 2001.
7. MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de Produtos Sustentáveis: Os requisitos ambientais dos produtos industriais**. São Paulo: EDUSP, 2002.
8. MANZINI, E. *Social Innovation* – apostila de curso. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2007.
9. MANO, E.B.; PACHECO, E.; BONELLI, C. M. **Meio ambiente, poluição e reciclagem**. São Paulo: Edgar Blücher, 2005.
10. SEIFFERT, Mari E. **ISO 14001: Sistema de Gestão Ambiental**. São Paulo: Atlas, 2007.
11. __,__. **A Reciclagem dos Plásticos**. Ciência Hoje – Nº 107; Vol. 18, (suplemento especial). São Paulo: SBPC, março de 1995.
12. www.wto.org/english/news, consultado em 13/02/2007;
13. www.institutodopvc.org/reciclagem/base3.htm, consultado em 20/03/2007;

¹ Dados não consolidados em decorrência de métodos diferenciados aplicados por diversos organismos para análises de oferta e demanda.

² As *pseudo-commodities* e *specialties* também poderão se classificadas como plásticos de engenharia dada aos índices apresentados pela propriedades.