



Polímero de interesse industrial: um estudo sobre a borracha

Verônica Prodóssimo^{1*}

¹Professora da Escola Estadual Américo de Paiva, Ensino Médio, Monte Santo de Minas, Minas Gerais, Brasil. *tjveflower@yahoo.com.br

Recebido em: 03/08/2021

Aceito em: 25/08/2021

Publicado em: 25/09/2021

RESUMO

A Borracha natural é proveniente da coagulação de látices da seringueira, sendo um polímero obtido mediante polimerização do monômero 2-metil-1,3-butadieno. A extração da borracha natural trouxe grande poder econômico para o Brasil, principalmente na região amazônica sendo utilizada na produção de vários artefatos, mas logo se observou que em temperaturas elevadas ela apresentava amolecimento e congelamento em baixas temperaturas. Por volta de 1939 o inventor Goodyear descobriu que o tratamento com enxofre, denominado vulcanização provocava uma melhora nas propriedades químicas e físicas da borracha. Atualmente, após o processo de obtenção do látex, é realizado um preparo do mesmo por meio de aditivos químicos, o que torna a borracha um material de grande aceitação industrial, por adquirir propriedades como resistência a deformação a altas e baixas temperaturas, além de resistência a abrasão e a compressão. O aumento em sua produção e pesquisas químicas surgiram as borrachas sintéticas, a tornando um polímero de grande interesse industrial. A maior parte da produção de borracha é destinada à fabricação de pneus, e seu descarte tem provocado problemas ambientais que podem ser amenizados com a reciclagem e reaproveitamento de pneus usados.

Palavras-chave: Polímero. Borracha. Vulcanização.

Polymer of industrial interest: a study on rubber

ABSTRACT

Natural rubber comes from the coagulation of rubber tree latexes, being a polymer obtained by polymerization of the monomer 2-methyl-1,3-butadiene. The extraction of natural rubber brought great economic power to Brazil, especially in the Amazon region, being used in the production of various artifacts, but it was soon observed that at high temperatures it showed softening and freezing at low temperatures. Around 1939, inventor Goodyear discovered that the sulfur treatment, called vulcanization, caused an improvement in the chemical and physical properties of rubber. Currently, after the process of obtaining the latex, it is prepared using chemical additives, which makes rubber a material of great industrial acceptance, as it acquires properties such as resistance to deformation at high and low temperatures, in addition to resistance abrasion and compression. The increase in its production and chemical researches emerged the synthetic rubbers, making it a polymer of great industrial interest. Most of the rubber production is destined to the manufacture of tires, and its disposal has caused environmental problems that can be alleviated with the recycling and reuse of used tires.

Keywords: Polymer. Rubber. Vulcanization.

INTRODUÇÃO

Dentre todos os tipos de materiais poliméricos as borrachas possuem uma estrutura química que lhe confere propriedades únicas como: elasticidade, flexibilidade,

isolamento elétrico, resistência à abrasão e à corrosão, impermeabilidade e fácil adesão à tecidos e ao aço.

As propriedades químicas e físicas da borracha a torna uma excelente matéria prima para setores industriais variados, como na indústria automobilística, na aviação, em manufatura de sapatos, correias, anéis de vedação, materiais cirúrgicos, revestimentos de materiais têxteis, corretivo de traços feitos a lápis. Atualmente existem no mercado global mais de 50 mil artefatos de borracha.

Devido suas múltiplas aplicações, a borracha desempenha um importante papel econômico.

A seringueira, *Hevea brasiliens*, é a principal fonte de borracha natural produzida no mundo. Sua produção mundial em 2004 foi de 8.465 mil toneladas, para um consumo de 8.224 mil toneladas do qual mais de 78% é originária do sudeste asiático.

O Brasil, berço do gênero *Hevea brasiliens*, continua sendo um país importador de borracha natural, neste mesmo ano atingiu a produção recorde de 100 mil toneladas, cerca de 1% da produção mundial, sendo o estado de São Paulo responsável por 50% da borracha produzida (SANTOS, 2007, p. 39).

Nos estados da Bahia e Espírito Santo o investimento previsto na plantação de seringueiras é de R\$ 730 milhões, permitindo que a Bahia produza 73.730 toneladas e o Espírito Santo 37.920 toneladas.

Entre janeiro de 2002 e 2007 o valor do quilo da borracha obteve uma gradual variação de 158% (VALVERDE, 2007, p. 44).

Em vista da grande produção de borracha natural no país acredita-se que, as perceptivas de crescimento da produção de borracha natural no Brasil sejam muito positivas. Espera-se que dentro de alguns anos o país possa, pelo menos, suprir as necessidades da indústria nacional (SANTOS, 2007, p. 40).

O mundo continua sendo moldado pela borracha, sem ela as enormes mudanças trazidas pela mecanização não teriam sido possíveis (COUTEUR, 2006, p. 147).

Por vários motivos a borracha é um material considerado de importância estratégica na sociedade, o estudo detalhado de sua estrutura química e sua manipulação permite compreender suas propriedades únicas as quais a tornam um polímero de grande interesse industrial trazendo muitos benefícios para a sociedade.

Dada a importância econômica e social da borracha, este trabalho tem como objetivos apresentar um breve histórico sobre a borracha bem como discutir os aspectos químicos dos processos de preparação e polimerização relacionando estrutura química com as propriedades da borracha apontando também os possíveis problemas ambientais relacionados à utilização indiscriminada da mesma.

METODOLOGIA

As origens da borracha natural

A borracha natural é o produto sólido obtido pela coagulação de látices de determinados vegetais, sendo o principal a *Hevea brasiliensis*. Essa matéria prima vegetal, proveniente da planta conhecida vulgarmente como seringueira (SANTOS, 2007, p.32).

A seringueira já era conhecida dos indígenas da América Central e do Sul. Eles a chamavam de “*cahuchu*” que significa “pau que chora”, devido à exsudação de uma secreção, após incisão na casca, denominada látex.

Bolas de borracha encontradas em um sítio arqueológico mesoamericano próximo de Veracruz, no México, datam de algum momento entre 1.600 e 1.200 a.C. Em 1495, Cristovão Colombo em sua segunda viagem ao Novo Mundo observou índios brincando com bolas feitas com resina vegetal. Assim, Colombo levou um pouco desse novo material para a Europa.

Em 1735 Charles - Marie de la Condamine foi o primeiro a fazer um estudo científico sobre a borracha, que ele conhecera durante viagem ao Peru. Ele observava os índios coletando seiva branca e pegajosa da árvore, defumavam-na e moldavam-na numa variedade de formas para fazer vasilhas, bolas, chapéus e botas. La Condamine aproveitou a oportunidade para explorar a selva sul americana e retornou a Paris, com várias bolas da resina coagulada da árvore da borracha, que durante a viagem de navio fermentaram chegando a Europa, como uma massa inútil e malcheirosa (COUTEUR, 2006, p. 131).

Em 1770 o químico inglês Joseph Priestley descobriu que a substância podia ser usada para apagar traços feitos a lápis, a borracha recebeu então o nome de “*Índia’s Rubbers*” que significa “Raspados da Índia” o que reforçou a ideia errônea de que a borracha vinha da Índia.

Em 1823 o químico Charles Macintosh, usou nafta como solvente para converter borracha num revestimento flexível para tecidos. A descoberta de Macintosh levou a um aumento do uso da borracha em motores, mangueiras, botas e galochas, bem como em chapéus, casacos e as capas de chuva que levam o sobrenome do químico na Grã Bretanha até os dias de hoje.

No início da década de 1830 os Estados Unidos foram tomados por uma febre de borracha. Mas, apesar de suas qualidades impermeáveis, a popularidade das peças de roupas emborrachadas declinou à medida que as pessoas foram percebendo que no inverno, elas ficavam duras e quebradiças enquanto que no verão derretiam.

Por volta de 1834, o inventor e empresário norte-americano Charles Goodyear deu início a uma série de experimentos que incluía misturar pó seco com a borracha, o que tornaria possível a absorção do excesso de umidade que a tornava pegajosa quando exposta a maiores temperaturas. Seguindo essa linha de raciocínio, Goodyear tentou misturar várias substâncias com borracha natural, como por exemplo, ácido nítrico entre outros. Nada funcionava (COUTEUR, 2006, p. 137).

Em 1839, Goodyear descobriu que o tratamento com enxofre a altas temperaturas provocava uma melhora nas propriedades químicas e físicas, não havendo mais o amolecimento do material em temperaturas elevadas ou o congelamento em contato com o frio, além de torná-la mais resistente quimicamente.

Este tratamento por enxofre realizado com a borracha foi denominado processo de vulcanização, e a descoberta da vulcanização foi atribuída a Charles Goodyear nos Estados Unidos, e a Thomas Hancock, na Inglaterra. Ambos desenvolveram patentes em 1840 (COSTA, 2008).

A descoberta do processo de vulcanização foi fator decisivo para o progresso da aplicação industrial da borracha, aumentando sua procura no mercado mundial.

Em 1845 R. W. Thomson inventou o pneumático, a câmara de ar e a banda de rodagem ferrada. Em 1850 fabricavam-se brinquedos de borracha, bolas ocas e maciças (para golfe e tênis). Em 1895, Michelin adaptou o pneu ao automóvel.

No ano de 1973, constatou-se que 60 a 70% da borracha produzida no mundo foi destinada à fabricação de pneumáticos.

Hoje, devido as suas múltiplas aplicações, a borracha se tornou uma importante matéria prima, passou a ocupar um lugar preponderante no mercado mundial, desempenhando um papel importante na civilização moderna (SANTOS, 2007, p. 40).

Histórico da borracha natural no Brasil

Numerosas espécies botânicas, espalhadas pelo planeta, produzem borracha. Entretanto a única espécie que gera borracha de alta qualidade e em condições econômicas é a *Hevea brasiliensis*, a seringueira, da família das euforbiáceas, nativa da Amazônia, o que faz do Brasil um país de grande importância na história da borracha (MANO, 2004, p. 75).

No Brasil há notícias de produção de borracha natural a partir de 1840, nessa época migrantes nordestinos dirigiram-se para a Amazônia, dedicando-se a sua extração. Após a grande seca de 1877 cresceu o fluxo migratório, aumentando o número de pessoas dedicadas à extração do látex dando assim suporte ao monopólio brasileiro (LAROUSSE CULTURAL, 1998, p. 854).

Ao longo dos anos de 1890 a 1920, Manaus, a capital amazonense tornou-se o centro econômico do país. Ganhou sistemas de abastecimento de água, luz elétrica, telefone e grandes construções como o Teatro Amazonas (SANTOS, 2007, p. 33).

A figura 1 mostra o Teatro Amazonas, até hoje símbolo da riqueza advinda da borracha.

Figura 1 - Teatro Amazonas na cidade de Manaus inaugurado em 31 de dezembro de 1896



Fonte: (WIKIPEDIA, 2008).

A produção amazônica chegou a 42 mil toneladas anuais e o Brasil dominou o mercado mundial de borracha natural abastecendo a indústria automobilística americana e europeia. Contudo o Monopólio brasileiro foi quebrado depois que o inglês, Henry Alexander Wickham, deixou a Amazônia levando 70 mil sementes de *Hevea brasiliensis*, que juntamente com o botânico de Londres Joseph Hooker plantaram

sementes de seringueira, que depois de cultivadas foram enviadas 1.900 mudas à Ásia que hoje é responsável por 78% da produção mundial de borracha natural. Desde então, começou o declínio da borracha brasileira, provocando grande decadência econômica e social na Amazônia (SANTOS, 2007, p. 33; COUTEUR, 2006, p. 141).

Na Segunda Guerra Mundial, a produção da Amazônia reanimou-se ligeiramente, quando o governo federal encaminhou milhares de trabalhadores para suprir a produção de látex, comprometida pela guerra no Oriente.

No ano de 1927, a cultura da borracha em larga escala, nos moldes das fazendas no Oriente foi tentada na Amazônia, pela Companhia Ford. Em 1945, as concessões da Ford foram vendidas ao governo brasileiro; hoje restam 2,3 milhões de árvores em Belterra, situada no estado do Pará (LAROUSSE CULTURAL, 1998, p.854).

Em 1997, o Estado de São Paulo contava com 40.127 hectares de seringueiras plantados e distribuídos em vários municípios da região Noroeste. Para 2004 estima-se em cerca de 70.000 hectares plantados.

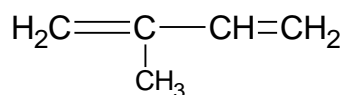
A produção brasileira estimada em 90 mil toneladas de borracha beneficiada atinge apenas cerca de 40% da demanda de 230 mil toneladas. O setor de pneumáticos utiliza 70% de toda borracha do país, enquanto os outros 30% vão para o setor de artefatos de borracha.

O Brasil possui uma área incomparavelmente maior para o plantio de seringueira, o déficit de produção significa descaso para com um produto estratégico de tão alto valor econômico-social, no entanto o Brasil que era, até as primeiras décadas do século XX, o único produtor de borracha natural, passou a contribuir com apenas 1% do total da produção a nível mundial. Espera-se que dentro de alguns anos o país possa suprir as necessidades da indústria nacional (SANTOS, 2007, p. 40; MANO, 2004, p. 75).

Origens da borracha sintética

Por volta de 1829, o químico e físico inglês Michael Faraday analisou pela primeira vez a borracha natural e verificou que ela era composta de carbono (C) e hidrogênio (H) na proporção de 5 para 8. Análises posteriores determinaram sua fórmula estrutural e os químicos puderam iniciar as primeiras tentativas para a síntese da borracha, que é feita a partir do isopreno, 2-metil-1,3-butadieno, que possui a mesma fórmula empírica da borracha (C₅H₈), como mostra a figura 2.

Figura 2 – Estrutura do Isopreno



Fonte: (MORRISON, 1996, p. 486).

Os trabalhos foram infrutíferos e apenas em 1930 nos EUA, a companhia Du Pont conseguiu preparar uma borracha denominada neoprene, a partir do cloropreno, cuja fórmula é quase idêntica à do isopreno, diferindo apenas por ter um átomo de cloro no lugar do radical metila (LAROUSSE CULTURAL, 1998, p. 855).

No decorrer da Segunda Guerra Mundial aconteceram grandes desenvolvimentos na produção de borracha sintética devido à queda de suprimento de borracha natural no mundo (FERREIRA, 1999, p. 3).

Terminada a guerra, a produção de borrachas sintéticas então denominadas elastômeros passaram a expandir seus processos, utilizando novas matérias primas. A produção de quantidades gigantescas de borracha em tão curto período de tempo foi qualificada como a segunda façanha da engenharia química no século XX, depois da construção da bomba atômica.

Devido à expansão do mercado brasileiro de elastômeros, foram instaladas duas fábricas no Brasil, que utilizavam matéria-prima nacional: uma de estireno-butadieno, substâncias obtidas a partir do gás petróleo, outra de polibutadieno, a partir de gás de petróleo e álcool etílico (COUTEUR, 2006, p. 137; LAROUSSE CULTURAL, 1998, p. 855).

A borracha natural e a sintética foram gradualmente sendo introduzidas em todos os campos da atividade humana oferecendo novas possibilidades de aplicação. Hoje a borracha é um material indispensável e a falta desta poderá colocar em risco o desenvolvimento da tecnologia e muitas realizações da vida moderna (FERREIRA, 1999, p. 3).

CULTIVO E PRODUÇÃO DE BORRACHA NATURAL

Cultivo do látex de seringueira

A borracha natural está presente no látex de mais de 7.000 espécies de plantas dentre as quais a mais importante é a *Hevea brasiliensis* que é responsável por cerca de 99% de toda borracha produzida no mundo.

O cultivo da *Hevea brasiliensis* inicia-se a partir de quando as sementes são levadas para uma estrutura do viveiro chamada sementeira, onde encontram condições ideais para sua germinação. Na época apropriada estas plântulas serão retiradas da sementeira e transplantadas para o viveiro de chão, após seu desenvolvimento é transplantada para o saco plástico, logo, o seringal apresentará características de floresta tropical. A seringueira poderá ser sangrada, ou seja, retirar o látex através de incisões feitas no tronco da árvore, a partir do sexto ou sétimo ano, alcançando o máximo de produção do quarto ano de sangria em diante. (SANTOS, 2007, p.36).

A Figura 3 apresenta a obtenção do látex através de sangria, sob a incisão no tronco da árvore, se fixa uma tigela para recolhê-lo.

Figura 2 - Processo de obtenção natural do látex



Fonte: (SANTOS, 2007, p.38).

O látex obtido da *Hevea brasiliensis* é liberado dos tecidos da árvore mais especificamente dos laticíferos que estão localizados no floema. Quando cortados por ocasião da sangria, a pressão existente no interior destes laticíferos (pressão de turgor) de ordem de 10 a 12 atmosferas, expulsa o látex promovendo o fluxo. Com o passar do tempo o fluxo do látex diminui e é interrompido quando as extremidades cortadas dos vasos laticíferos são obstruídas pelo látex coagulado.

A produtividade da seringueira e a qualidade do látex dependem da capacidade de regeneração do látex pela árvore entre duas sangrias e da duração do fluxo do látex durante a sangria, sendo também influenciadas pelo uso de substâncias estimulantes como ETHREL (ácido 2-cloroetilfosfônico) permitindo o aumento do fluxo de látex por sangria, tornando viável a diminuição na frequência de sangria.

A sangria excessiva e o “stress” provocado nas árvores devido aos tratamentos com estimulantes causam uma anomalia na árvore, destruindo os sistemas laticíferos fazendo cair a produtividade da árvore impedindo que ela seja sangrada. Os sintomas externos são: modificação da cor do tronco que passa de marrom-amarelado para marrom escuro, a casca fica com espessura fina, tornando-se quebradiça (SANTOS, 2007, p. 37,38; FERREIRA, 1999, p. 17).

Composição e propriedades do látex de seringueira

O látex de seringueira é formado por três componentes fundamentais:

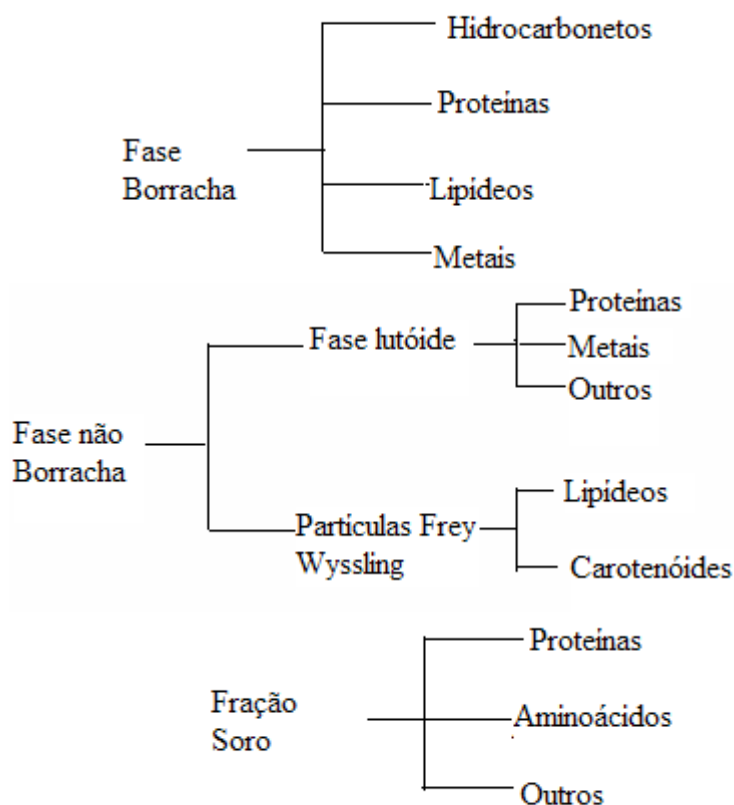
a) Fase borracha (37%): apresenta coloração branca é constituído por 96% de hidrocarboneto, 1% de proteína e 3% de lipídeos e alguns traços de magnésio, potássio e cobre.

b) Componentes não borracha: Apresenta coloração amarela e são constituídos pelos lutóides e as partículas Frey Wyssling.

c) Soro (48%): é o meio dispersivo do sistema coloidal látex. Uma variedade de substâncias está suspensa no soro, a saber: proteínas, açúcares, álcoois, ácidos graxos, e pequenas quantidades de substâncias minerais.

Desta forma, o látex natural de seringueira é um sistema coloidal, polifásico e polidisperso. A fase dispersa é constituída de micelas de borracha, lutóides e partículas Frey Wyssling e o meio dispersivo é constituído do soro aquoso. A figura 4 apresenta os constituintes das três fases da borracha de seringueira (FERREIRA, 1999, p. 10; FERREIRA, 1998, p. 4).

Figura 4 – Frações do látex ultra centrifugado



Fonte: (FERREIRA, 1999, p. 11).

A maioria dos constituintes influenciam as propriedades da borracha. As proteínas afetam a resistência, os aminoácidos são responsáveis pelo endurecimento por tempo de estocagem, o magnésio presente nas partículas lutóides desestabilizam o látex e os ácidos graxos de alta massa molar são responsáveis pelo aumento da concentração influenciando no tempo de estabilidade mecânica do látex (FERREIRA, 1999, p. 13).

Preparação do látex para uso industrial

Para que o látex seja utilizado como matéria de aplicação técnica, é necessário que através de processos de beneficiamento ele adquira características capazes de fazer com que o produto possa receber utilização prática.

Os processos de beneficiamento iniciam-se cerca de 8 a 10 horas após a colheita, onde o látex se coagula espontaneamente pela ação de bactérias e microrganismos presentes no soro e no ar. Esta coagulação separa a borracha em forma de coágulo que com o tempo adquire mau cheiro, tornando o látex um produto perecível.

A coagulação da borracha ocorre quando as bactérias atacam os açúcares do látex, gerando ácidos graxos de baixa massa molecular. Esses ácidos abaixam o pH do látex cujo valor está em torno de 4,5 este é o chamado ponto isoelétrico do látex (o valor de pH onde a molécula apresenta carga elétrica líquida igual a zero), causando coagulação e coalescência das partículas de borracha.

Portanto, para evitar a degradação por microrganismos, o látex deve ser estabilizado com soluções alcalinas. O agente estabilizante geralmente utilizado é a solução de amônia (NH₄OH) em quantidades suficientes para elevar o pH do látex por volta de 10,2. Esta quantidade embora seja um tanto variável de um látex para outro, para fins práticos recomenda-se à quantidade de 2% de amônia calculada sobre a fase líquida.

A coagulação espontânea provoca a degradação, mas há necessidade de coagulação do látex por métodos eficientes tais como a adição de ácido, solução de sais de alguns metais ou álcoois (FERREIRA, 1999, p. 12; FERREIRA, 1998, p. 5,6).

Após a coagulação, é realizado a separação do polímero com massa molecular da ordem de 10⁵.

Os artefatos de borracha são feitos a partir de uma composição que tem como componente principal um polímero.

Para que a borracha seja convertida em material tecnicamente utilizável adquirindo características finais exigidas pelo mercado consumidor são incorporados ao polímero determinados produtos.

Para preparar uma composição polimérica, o polímero e os ingredientes devem ser misturados em equipamento adequado, onde é feita a homogeneização da massa, à temperatura conveniente. A massa é comumente designada composição vulcanizável. Os principais ingredientes são os seguintes:

- Agente de vulcanização;
- Acelerador;
- Ativador;
- Carga (reforçadora ou inerte);
- Antioxidante;
- Plastificantes.

Nesse estágio ocorre a reação de vulcanização, que consiste de uma rede de ligações cruzadas que restringem os escoamentos relativos entre as cadeias poliméricas.

Nessa condição, o polímero que era solúvel e fusível, passa a material insolúvel e infusível, pela reticulação molecular.

Após adquirir tais características, a composição vulcanizável é denominada composição moldável de borracha podendo assumir a forma desejada, e por fim empregada para a fabricação de artefatos de borracha (MANO, 2004, p.59).

POLÍMERO DE INTERESSE INDUSTRIAL: BORRACHAS

Polímeros e polimerização

Quando as moléculas se tornam muito grandes, contendo um número de átomos encadeados superior a uma centena, e podendo atingir valor ilimitado adquirindo elevada massa molecular, apresentando unidades químicas repetidas denomina-se macromoléculas. As propriedades das macromoléculas decorrem das interações envolvendo segmentos intramoleculares, da mesma macromolécula, ou intermoleculares, de outras. Ligações hidrogênio e interações dipolo-dipolo, ao lado de forças de Van der Waals, que atuam nessas macromoléculas no estado sólido, criam resistência muito maior do que no caso de moléculas menores, isto é, moléculas de cadeia curta. Em solução, essas interações entre moléculas de alto peso molecular acarretam um aumento na viscosidade, que não se observa com as moléculas menores.

As macromoléculas possuem capacidade de formação de películas, ou filmes, sólidos, sendo um dos meios mais simples e imediatos para o seu reconhecimento.

Polímeros, vêm do Grego (“*poly*” + “*mer*”, muitas partes) são macromoléculas que possuem unidades químicas ligadas por covalências, repetidas regularmente ao longo da cadeia, denominadas *meros*. O número de meros da cadeia polimérica é denominado grau de polimerização, sendo geralmente simbolizado por *n* ou *DP*.

Monômeros são micromoléculas; são compostos químicos capazes de reagir para formar polímeros. A reação química que conduz à formação de polímeros é a polimerização, uma reação funcional, capaz de continuar indefinidamente.

A polimerização pode envolver reações de adição, ou poliadições e reações de condensação ou policondensações. Os polímeros de adição em geral possuem a cadeia regularmente constituída por apenas átomos de carbono, ligados covalentemente, comumente preparados a partir de monômeros contendo uma ou mais ligações duplas. Os polímeros de condensação apresentam em sua cadeia principal átomos de carbono e

de outros elementos, como oxigênio, nitrogênio, enxofre, fósforo e outros (ALLINGER et al., 1976, p. 613; MANO, 2004, p. 1,2).

Considerando o mecanismo envolvido no processo, a poliadicação é uma reação em cadeia, apresentando três diferentes componentes reacionais: a iniciação, a propagação e a terminação, todos com velocidades e mecanismos diferentes. A policondensação é uma reação em etapas, em que não há distinção reacional entre o início da formação do polímero e o crescimento macromolecular, ou a interrupção deste crescimento.

O peso molecular resultante em poliadicações é usualmente da ordem de 10^5 enquanto que em policondensações o peso molecular é de 10^4 , isto é, uma ordem de grandeza abaixo do peso molecular obtido nas poliadicações.

Quando o polímero tem apenas um tipo de mero denomina-se homopolímero. Quando há mais de um tipo de mero, é designado copolímero, e os monômeros que lhe dão origem comonômeros.

Os copolímeros cujas unidades químicas não seguem qualquer sequência, dispondo-se ao acaso, são chamados copolímeros aleatórios. Quando a regularidade de sequenciação, dispondo-se as unidades químicas diferentes de modo alternado, são chamados de copolímeros alternados. Quando, ao invés de uma unidade química de cada tipo, alternam-se sequências de unidades químicas iguais, o produto é denominado copolímero em bloco. No caso particular de esses blocos existirem como ramificações poliméricas, partindo do esqueleto principal da macromolécula, o copolímero é dito graftizado. A Tabela 1 resume esses conceitos (MANO, 2004, p. 3-6).

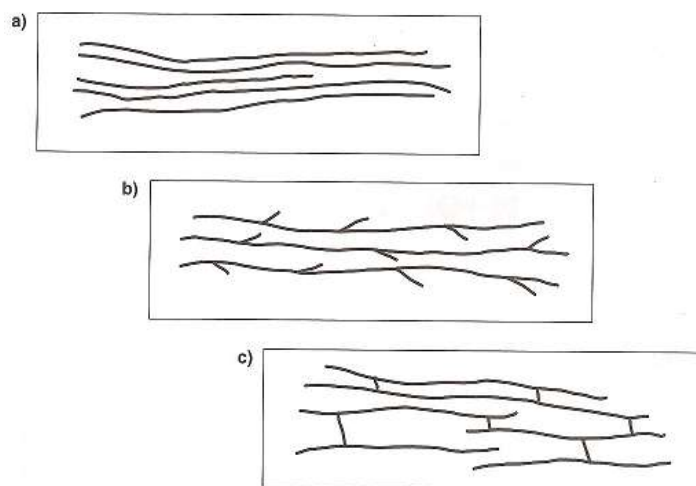
Tabela 1 – Cadeias macromolecular em homopolímeros e copolímeros

| Monômero | Polímero | Representação |
|----------|-----------------------|---------------------------|
| A | Homopolímero |A-A-A-A-A-A..... |
| B | Homopolímero |B-B-B-B-B-B..... |
| A+B | Copolímero Alternado | ...A-B-A-B-A-B-A-B... |
| A+B | Copolímero em Bloco | ...A-A-A-A-B-B-B-B... |
| A+B | Copolímero Graftizado | B-B..... |
| | |A-A-A-A-A-A..... |
| | |B-B-B-B..... |
| A+B | Copolímero Aleatório | ...A-B-B-A-A-B-A-A-A-B... |

(MANO, 5).

Os polímeros podem ter suas cadeias sem ramificações denominadas polímeros lineares. Podem apresentar ramificações, sendo denominados polímeros ramificados. Podem ainda exibir cadeias mais complexas, com ligações cruzadas, formando polímeros reticulados como demonstrado na figura 5 (MANO, 2004, p. 7).

Figura 3 - Representação de cadeias macromoleculares (a) Cadeia sem ramificações (b) Cadeia com ramificações (c) Cadeia reticulada



Fonte: (MANO, 2004, p. 9).

Nomenclatura de polímeros

Três diferentes sistemas são empregados pra designação de polímeros. Baseiam-se na origem do polímero, isto é, na nomenclatura dos monômeros que foram empregados na sua preparação; na estrutura do mero, isto é, na unidade química que se repete ao longo da cadeia macromolecular; ou em siglas, baseadas em abreviações do nome dos monômeros escritos em Inglês.

O sistema de denominação com base na origem do polímero estabelece que, para os homopolímeros, basta colocar o prefixo poli, seguido do nome do monômero. Para um copolímero coloca-se o prefixo copoli, seguido dos comonômeros, separados por barras e contidos entre parênteses.

A denominação segundo a estrutura do mero, é o mais empregado; por exemplo, ao invés de polieteno e polipropeno, são usados os termos polietileno e polipropileno, pois em química orgânica a terminação ileno caracteriza um grupamento divalente em dois átomos de carbono vicinais.

No caso das borrachas ou elastômeros diênicos são empregadas siglas referentes aos monômeros e à natureza elastomérica do produto. Exemplo BR (“*butadiene rubber*”, borracha de polibutadieno).

Nos polímeros não-diênicos elastoméricos são ainda empregadas siglas: TPR (“*thermoplastic rubber*”, borracha termoplástica) (MANO, 2004, p.10-11).

Classificação dos polímeros

Segundo a origem do polímero, este pode ser distribuído em dois grandes grupos: naturais e sintéticos.

Quanto ao número de monômeros envolvidos na formação da cadeia macromolecular, os polímeros podem ser classificados em homopolímeros e copolímeros.

Em relação ao método de preparação do polímero, é bastante usual a classificação em polímeros de adição e polímeros de condensação.

Conforme a estrutura química cadeia polimérica, isto é, conforme os grupos funcionais presentes na macromolécula, os polímeros podem ser distribuídos em inúmeros grupos, como poli-hidrocarbonetos, poliamidas, poliésteres e outros. Os poli-hidrocarbonetos podem ter cadeia saturada ou insaturada, substituídos ou não por átomos (cloro, flúor e outros).

Quanto à configuração dos átomos na cadeia polimérica, se o monômero é um dieno conjugado, na poliadição podem surgir sequências com a configuração *cis* ou *trans* (MANO, 2004, p. 13-14).

Os polímeros podem ser agrupados em termoplásticos e termorrígidos. Os polímeros termoplásticos fundem por aquecimento e solidificam por resfriamento, em um processo reversível podendo ser dissolvidos em solventes adequados. Os polímeros termorrígidos, por aquecimento assumem estrutura reticulada, com ligações cruzadas tornando-se infusíveis.

O polímero termorrígido pode ser denominado termorrígido químico sendo insolúvel em quaisquer solventes e em termorrígido físico podendo ser solúvel em solventes adequados.

De acordo com o comportamento mecânico dos polímeros, os materiais macromoleculares podem ser divididos em três grandes grupos: borrachas, plásticos e fibras. As faixas que demarcam, embora muito fluidamente, os limites do módulo

elástico, diferenciando borrachas, plásticos e fibras são: 10^1 a 10^2 , 10^3 a 10^4 , e 10^5 a 10^6 psi ($1 \text{ psi} = 0,07 \text{ kg cm}^{-2} = 7 \times 10^3 \text{ Pa}$), respectivamente.

Assim a borracha, ou elastômero, é um material macromolecular que exibe elasticidade em longa faixa, a temperatura ambiente. Plástico (do Grego “adequado à moldagem”) é um material macromolecular que embora sólido no estado final, em algum estágio de seu processamento pode tornar-se fluido e moldável, por ação isolada ou conjugada de calor e pressão. Fibra é um termo geral que designa um corpo flexível, cilíndrico, com pequena seção transversal, com elevada razão entre o comprimento e o diâmetro (superior a 100). As fibras são empregadas em indústrias têxteis (MANO, 2004, p. 13-15).

Polimerização de borracha natural

Dentre todos os tipos de materiais poliméricos, as borrachas ou elastômeros se distinguem por sua característica única de permitir grande alongamento, seguido instantaneamente de quase completa retração (MANO, 2004, p.75).

A borracha natural é um polímero da molécula de isopreno. Com apenas cinco átomos de carbono, o isopreno é a menor unidade repetitiva entre todos os polímeros naturais, o que faz da borracha o polímero natural mais simples (COUTEUR, 2006, p. 132).

O isopreno possui fórmula química C_5H_8 é caracterizado por ligações duplas conjugadas, podendo ocorrer ressonância, sendo que a ressonância de menor energia, determina a estrutura convencional do isopreno, isso é ilustrado pela figura 6 (ALLINGER et al., 1976, p. 136).

Figura 4 - Ressonância do 2-metil-1, 3-butadieno (isopreno)

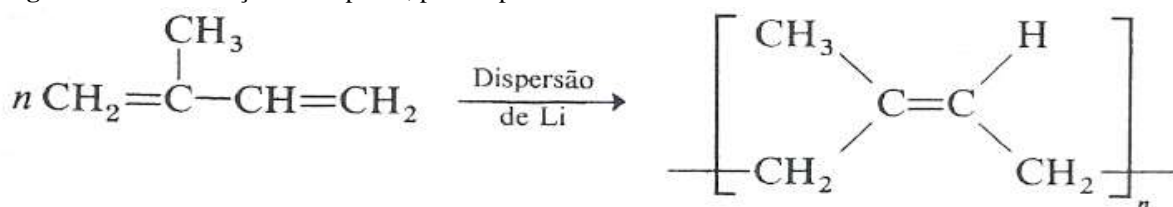


A polimerização do isopreno se dá mediante poliadição sendo uma reação em cadeia, apresentando três diferentes componentes reacionais: a iniciação, a propagação e a terminação.

Para monômeros, contendo insaturação entre os átomos de carbono a iniciação é aniônica, ou seja, o iniciador é um reagente nucleófilo (por exemplo :NH_2). A adição do iniciador forma um carbocátion, ou seja, um intermediário reativo.

O iniciador mais usado na polimerização do isopreno é o lítio dissolvido em amônia líquida, conhecido como dispersão de lítio, a figura 7 demonstra a polimerização do isopreno (ALLINGER et al., 1976, p. 297).

Figura 5 - Polimerização do isopreno, por Dispersão de lítio

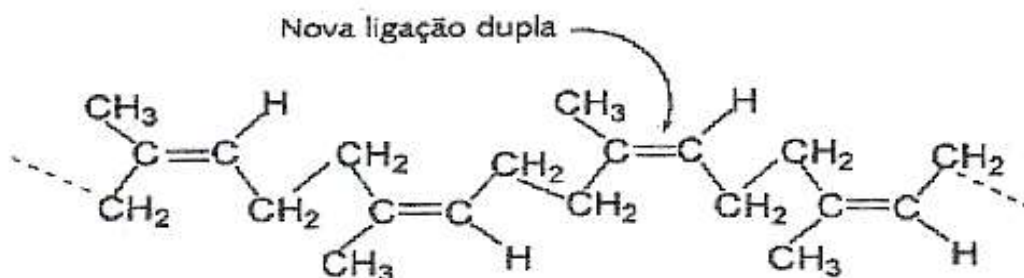


Fonte: (ALLINGER et al., 1976, p. 297).

Depois de gerado um intermediário reativo, iniciará a propagação onde desencadeará adições rápidas e sucessivas de muitas moléculas de isopreno, ocorrendo o crescimento da cadeia.

Assim que moléculas de isopreno se agregam são formadas ligações duplas *cis*, fornecendo rigidez a molécula, impedindo a rotação, como apresenta a figura 8 (COUTEUR 2006, p. 132).

Figura 6 – Modelo de estrutura de *cis*-poliisopreno

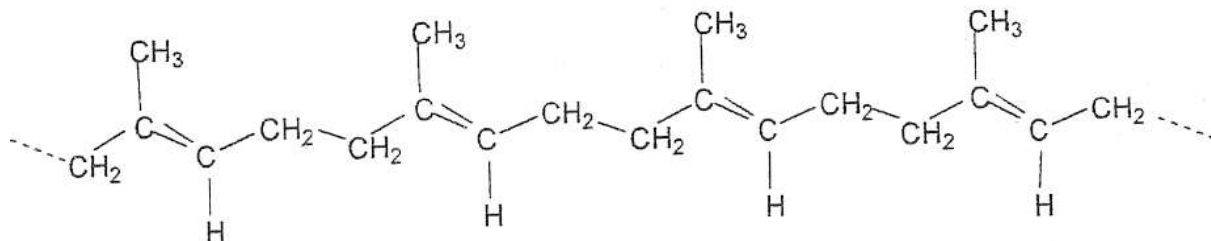


Fonte: (COUTEUR, 2006, p. 133).

O polímero da borracha natural tem configuração química muito regular, é uma cadeia *cis*-poliisoprênica que é essencial para a elasticidade da borracha.

Quando a cadeia é *trans*-poliisoprênica, o produto não é borrachoso, é altamente cristalino e muito mais duro; é encontrada na guta percha (*Palaquin oblongifolium*) e na balata (*Minusops bidentata*), ambas da família das sapotáceas, a figura 9 ilustra o *trans*-poliisopreno (MANO, 2004, p. 76).

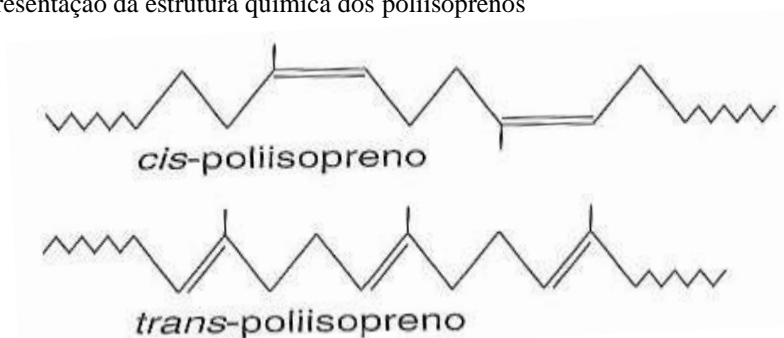
Figura 7 – Estrutura de um polímero *trans*-poliisopreno



Fonte: (COUTEUR, 2006, p. 135).

A representação da estrutura química em linhas dos poliisoprenos encontra-se na figura 10.

Figura 8 - Representação da estrutura química dos poliisoprenos



Fonte: (MANO, 2004, p. 76).

Uma vez originada a cadeia polimérica a terminação é a fase final onde ocorre à desativação da cadeia propagante, pode ser conseguida mediante reações com espécies químicas ativas ou inertes, ocasionando o término do crescimento.

Quando a interrupção do crescimento é causada pela reação de dois centros ativos, o processo é chamado de combinação. Quando é causada pela transferência de um átomo de hidrogênio de uma cadeia para outra cadeia em crescimento, saturando-se uma extremidade e criando-se uma dupla ligação na extremidade da outra cadeia, o processo é chamado de desproporcionamento. Quando o centro ativo passa para uma molécula de polímero inativa, o processo denomina-se transferência de cadeia; o centro

ativo pode ser gerado em qualquer ponto da molécula, porém, estatisticamente, isto ocorre ao longo da cadeia, gerando ramificações. Quando a interrupção do crescimento é causada pela reação de uma molécula inativa de monômero, ou solvente, ou impureza, os quais passam a radical livre, o processo também é chamado de transferência de cadeia (MANO, 2004, p. 47).

Após a polimerização a borracha deve possuir uma elevada massa molecular média, já que a elasticidade da borracha é consequência principalmente do desemaranhamento e emaranhamento das longas cadeias poliméricas. Os tipos comercializáveis de borracha natural apresentam a massa molar média em torno de $350.000 \text{ g mol}^{-1}$ (FERREIRA, 1999, p. 8).

Polimerização de borrachas sintéticas

As várias aplicações da borracha natural fizeram aumentar a sua demanda no mercado mundial. Para atender a grande procura surgiram às borrachas sintéticas.

As borrachas sintéticas mais importantes são também de estrutura poliidiênica, tal como a borracha natural, e são obtidas por poliadições, podendo ser homopoliméricas e copoliméricas.

Com catalisadores Ziegler–Natta é possível polimerizar o isopreno e conseguir produto sintético idêntico à borracha de fonte natural (SOLOMONS, 1996, p. 417).

Os catalisadores Ziegler–Natta são iniciadores ativos preparados a partir de halogenetos de metais de transição e um agente redutor. O mais comumente usado é o trietilalumínio e tetracloreto de titânio ($\text{AlEt}_3 \cdot \text{TiCl}_4$). A reação de crescimento da cadeia envolve a inserção do monômero na ligação entre o metal e a cadeia em crescimento. Com os catalisadores Ziegler–Natta pode-se produzir polímeros de cadeia linear com grande regularidade estequiométrica (ALLINGER et al., 1976, p. 617, 618).

O polímero polibutadieno (BR) preparado por poliadição de *cis*-polibutadieno e *trans*-polibutadieno é usado na aplicação de pneumático em geral (MANO, 2004, p. 76,79).

O uso de apenas um elastômero muitas vezes não é suficiente para se obter determinadas propriedades exigidas na aplicação de artefatos de borracha; torna-se então, necessário a mistura de dois ou mais elastômeros por copolimerização.

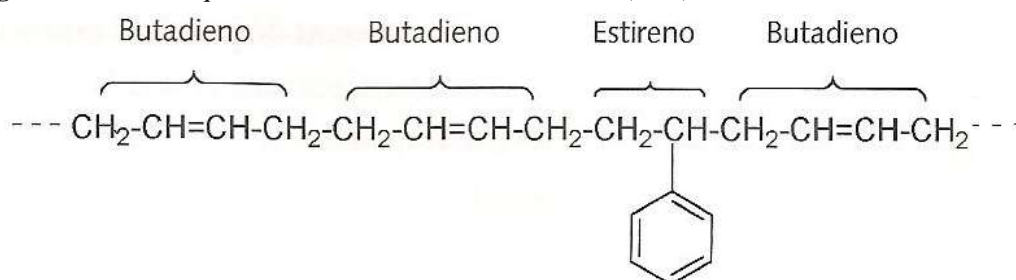
Misturas de elastômeros são feitas principalmente por três razões: melhorar as propriedades dos elastômeros originais, melhorar o processamento e diminuir o custo.

Essas misturas possibilitam que se consiga um balanço de propriedades onde vantagens de um elastômero compensem as desvantagens de outro e vice-versa.

Deste modo, produtos na indústria de borracha são total ou parcialmente baseados em misturas de elastômeros (CASTRO, 2008).

O elastômero sintético que concorre com a borracha natural no principal uso dos elastômeros que é a manufatura de pneus para automóveis é o SBR, um copolímero do butadieno (75%) e do estireno (25%), com ligações duplas aleatórias *cis* ou *trans*, como observado na figura 11 (MORRISON, 1996, p. 1228).

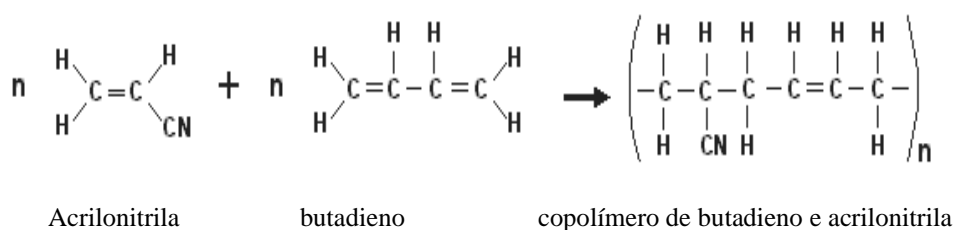
Figura 9 - Estrutura química da borracha estireno butadieno (SBR)



Fonte: (COUTEUR, 2006, p. 146).

O elastômero NBR, copolímero de butadieno e acrilonitrila como mostra a figura 12 possui propriedades como aderência a metais, resistência à gasolina que é de fundamental importância na manufatura de máquinas, gaxetas, mangueiras válvulas, e revestimentos de tanques industriais (MANO, 2004, p. 85).

Figura 10 – Copolimerização de butadieno e acrilonitrila



As borrachas vêm tendo grande aceitação no mercado mundial o que possibilita pesquisas e desenvolvimentos que auxiliam na sua produção. Na tabela 2 estão relacionados os principais elastômeros de importância industrial.

Tabela 1 – Principais elastômeros de importância industrial

| Sigla | Nome | Processo de Polimerização |
|--------------|--|----------------------------------|
| NR | Borracha natural | Biogênese |
| BR | Polibutadieno | Poliadição |
| IR | Poliisopreno | Poliadição |
| CR | Policloropreno | Poliadição |
| EPDM | Copolímero de etileno, propileno e dieno | Poliadição |
| IIR | Copolímero de isobutileno e isopreno | Poliadição |
| SBR | Copolímero de butadieno e estireno | Poliadição |
| NBR | Copolímero de butadieno e acrilonitrila | Poliadição |
| MQ, PDMS | Poli (dimetil-siloxano) | Policondensação |
| EOT | Polissulfeto | Policondensação |

Fonte: (MANO, 2004, p. 77).

Cargas e aditivos em borrachas

Vulcanização

Algumas propriedades da borracha mudam consideravelmente com a variação da temperatura. Quando a borracha é excessivamente resfriada, ela torna-se quebradiça. Quando aquecida, ela amolece tornando-se pegajosa (FERREIRA, 1999, p.9,10).

A principal propriedade da borracha é a elasticidade, devido sua enorme cadeia polimérica. Assim, quando o material é esticado, as cadeias isoladas podem deslizar uma sobre as outras, o que levaria a uma deformação permanente quando o material estiver sob tensão (ALLINGER et al., 1976, p. 616).

As mudanças físicas que ocorriam com a borracha quando submetida à variação de temperatura e a deformação que era verificada ao ser esticada a tornava um material de difícil manuseio na produção de seus artefatos.

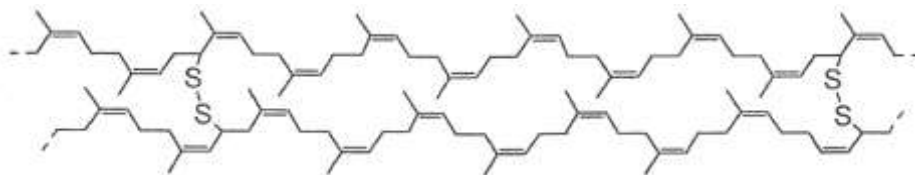
A borracha tornou-se um material tecnicamente utilizável quando se introduziram ligações químicas entre moléculas vizinhas da mesma, este processo foi denominado vulcanização (FERREIRA, 1999, p. 9).

Na vulcanização a borracha natural é aquecida com enxofre. A reação em que se produzem interligações entre as cadeias de *cis*-polisopreno. O enxofre reage nas duplas ligações e com os átomos de hidrogênio alílicos (SOLOMONS, 1996, p. 417).

A criação de uma quantidade suficiente dessas ligações dissulfur (-S-S-), formando ligações cruzadas, permite que as moléculas de borracha permaneçam flexíveis evitando escoamentos relativos entre cadeias poliméricas.

A formação das ligações cruzadas é um processo aleatório com uma ligação sendo formada, em geral, a cada 100 – 200 unidades monoméricas, a figura 13 mostra as moléculas de borracha com ligações cruzadas dissulfur (-S-S-) que impedem o deslizamento (FERRREIRA, 1999, p. 10).

Figura 11 - Borracha vulcanizada



Fonte: (COUTEUR, 2006, p.140).

A borracha macia usada para produzir elástico, contém cerca de 1 a 3% de enxofre; a borracha processada com 3 a 10% de enxofre tem mais ligações cruzadas, é menos flexível podendo ser usada em pneus para veículos (COUTEUR, 2006, p.140).

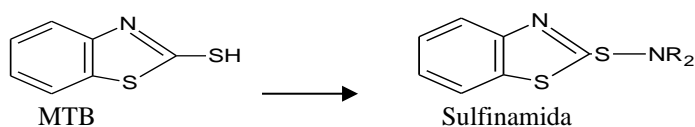
Aceleradores

Os vulcanizados apresentavam coloração intensa, indesejada migração do enxofre para a superfície (afloramento) e exibiam muita pouca resistência ao envelhecimento. Além dos diferentes tipos de ligações cruzadas com enxofre, os vulcanizados apresentavam uma grande proporção de modificações na cadeia principais como: ciclizações sulfídicas, insaturações conjugadas, e isomeria *cis/trans* da dupla ligação. Para evitar tais desvantagens adicionam-se aceleradores aos vulcanizados.

Os aceleradores orgânicos aumentam a velocidade de vulcanização, permite o emprego de temperaturas mais baixas e tempo de cura menor, é minimizadas a degradação térmica e oxidativa. Além disso, o nível de enxofre pode ser reduzido e, ainda assim, sem prejuízo para as propriedades físicas do vulcanizado. O resultado do uso de acelerador é a redução do afloramento de enxofre e a maior resistência ao envelhecimento. A possibilidade de reversão é reduzida. Vulcanizados transparentes ou coloridos podem ser preparados.

Aceleradores baseados no 2-mercaptobenzotiazol (MBT) e seus derivados são sem dúvida, a mais importante classe de aceleradores usados industrialmente. A figura 14 mostra a estrutura química do acelerador sulfinamida, derivada do MBT (COSTA, 2008).

Figura 12 - Sulfinamida derivada de MTB



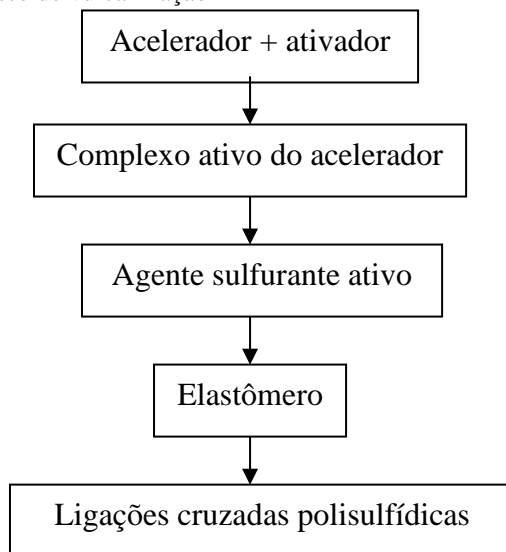
Fonte: (COSTA, 2008).

Ativadores

Os ativadores são responsáveis pela ativação da vulcanização, ou seja, aumenta a ação dos aceleradores orgânicos. Geralmente são empregadas duas substâncias, sendo mais utilizado o óxido de zinco e o ácido esteárico.

A rota geral do processo de vulcanização é descrita na figura 15. Primeiro um complexo ativo do acelerador é formado através de uma interação entre o acelerador e ativador, na presença de zinco solúvel. Esse complexo pode reagir com o enxofre molecular, mediante a abertura do anel S₈, para formar um agente sulfurante que reage com as cadeias de borracha para dar origem às ligações cruzadas polisulfídicas (COSTA, 2008).

Figura 13 – Rota geral do processo de vulcanização



Fonte: (COSTA, 2008).

Cargas

As cargas são adicionadas à borracha para proporcionar dureza, tenacidade, rigidez, resistência à abrasão e baixar o preço do composto. As cargas influenciam no aumento da viscosidade e da concentração da borracha.

O negro de carbono, vulgarmente conhecido como negro de fumo, é uma carga preta reforçante, uma das cargas mais utilizadas.

Os negros de carbono são materiais constituídos por carbono elementar sob forma de partículas aproximadamente esféricas, de diâmetro inferior a 1µm, aglutinadas em agregados e são produzidos pela conservação de hidrocarbonetos líquidos ou gasosos em carbono e hidrogênio, por combustão parcial ou por decomposição térmica (GOMES, 2008)

Há também cargas brancas compostas de carbono, que são utilizadas em borrachas coloridas.

Antioxidante

Os elastômeros vulcanizados, tal como a maioria dos materiais poliméricos, apresentam um envelhecimento, ou seja, perda das propriedades físicas, que são causadas por alterações químicas nas cadeias do polímero. O oxigênio é a causa principal do envelhecimento, mas as exposições ao tempo e a temperaturas elevadas também influem negativamente na cadeia. Para retardar ou evitar este fenômeno utilizam-se antioxidantes, que são capazes de reagir com os causadores do envelhecimento (ozônio, oxigênio, calor, luz e radiação), prevenindo ou diminuindo a falha do polímero, aumentando o seu tempo de vida.

Os antioxidantes podem dividir-se em químicos e físicos. No primeiro grupo têm-se três tipos de compostos usados: aminas secundárias, fenólicos e fosfitos. Em geral as aminas tendem a alterar a cor e por isso são usadas em borrachas pretas. Os antioxidantes fenólicos são usados em produtos manufaturados de cor clara. Por último, os antioxidantes a base de fosfitos têm a sua maior aplicação como estabilizadores na polimerização do SBR. Quanto aos antioxidantes físicos, eles são usados em produtos manufaturados que, em serviço, sofrem pequenos ou nenhum movimento. São ceras que migram para a superfície, formando uma camada protetora, evitando assim que a superfície seja afetada pelo oxigênio, ozônio e outros oxidantes (GOMES, 2008).

Lastificantes

Contribui para a redução da viscosidade do composto, melhorando a dispersibilidade e a incorporação das cargas durante a mistura, utilizados também para diminuir a deformação à compressão, e melhorar a dureza.

Os plastificantes mais comuns são: óleos vegetais, ésteres e plastificantes poliméricos (BERNARDI, 2008).

Outros ingredientes

A borracha é utilizada em vários artefatos, cada qual necessita de características que possibilitem atender o mercado específico, contudo há necessidade de adicionar aos elastômeros, ingredientes especiais como:

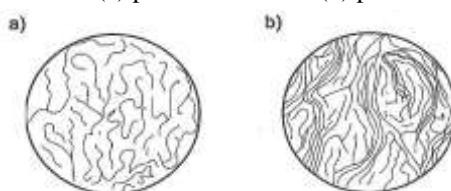
- Agentes de expansão: utilizados para obter borracha esponjosa ou microporosa.
- Pigmentos: usados para obter a cor desejada.
- Odorantes: essências e mascaradores de cheiros (BERNARDI, 2008)

Propriedades da borracha

As propriedades especiais da borracha resultam da estrutura do polímero.

Para que um polímero se comporte como borracha ele deve estar no estado amorfo, ou seja, quando moléculas se juntam de forma desordenada e as forças entre elas são fracas que elas mudam facilmente de lugar, pois a cristalinidade restringe os movimentos moleculares necessários para ocorrência da elasticidade, uma propriedade única dos elastômeros. A figura 16 ilustra o estado amorfo e cristalino de um polímero (ATKINS, 2007, p. 288; FERREIRA, 1999, p. 9).

Figura 14 – Estrutura macromolecular (a) polímero amorfo (b) polímero cristalino



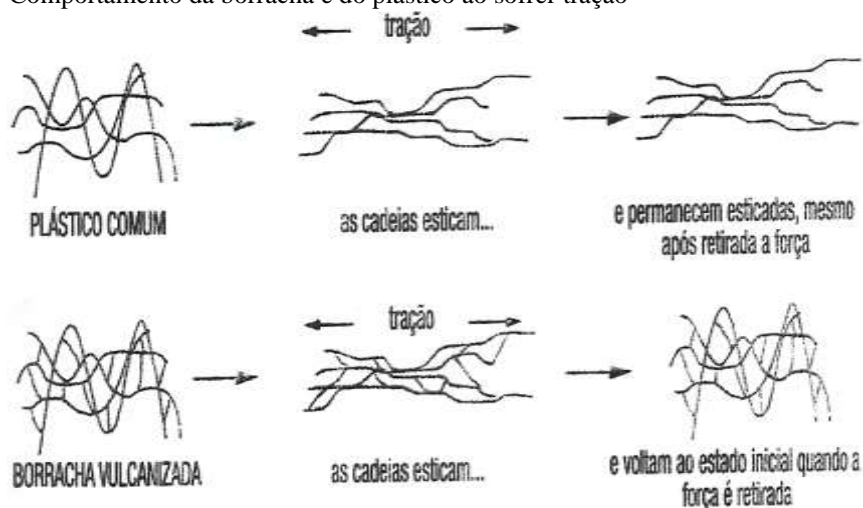
Fonte: (MANO, 2004, p. 35).

Um elastômero pode ser esticado até oito vezes o seu comprimento original e, no entanto, retornar a forma original quando cessa a tensão distensora (ATKINS, 2007, p. 803).

Moléculas grandes e flexíveis tendem a se enrolar de uma maneira caótica. As moléculas ficam desenroladas quando o material é esticado. Esse arranjo de moléculas desenroladas tem uma geometria mais específica do que o enrolamento caótico e, por isso, entropia muito menor. Assim, quando o material esticado é solto, a entropia aumenta e a borracha se contrai (ALLINGER et al., 1976, p. 616).

Após remover a força distensora, as cadeias moleculares de um elastômero não ficam distendidas e alinhadas porque as forças intermoleculares necessárias para as segurar na posição alinhada são fracas. Em geral, os elastômeros não contêm grupos funcionais fortemente polares ou capazes de formar ligações de hidrogênio. Assim a borracha possui a propriedade particular da elasticidade. Comparativamente, o plástico ao sofrer uma força distensora ele estica, mas não volta ao estado inicial, o que comprova que os limites do módulo elástico do plástico se diferenciam da borracha. Enquanto o limite do módulo elástico da borracha é 10^1 a 10^2 , o limite do módulo elástico do plástico é 10^3 a 10^4 , a figura 17 ilustra o comportamento da borracha e do plástico perante a tração (MANO, 2004, p. 15; MORRISON, 1996, p. 1227).

Figura 15 – Comportamento da borracha e do plástico ao sofrer tração



Fonte: (BIANCHI, 2005, p. 642).

Quando a borracha é estirada sem atingir a ruptura, o material se deforma e esquenta. Quando cessa a ação da força retorna à situação inicial e resfria. Esse comportamento termomecânico é explicado pela ocorrência de dois efeitos: o efeito Joule, entrópico, e o efeito histerese, friccional.

Efeito Joule é a mudança desordenada das macromoléculas, devido às vibrações térmicas, para a condição de ordem parcial por estiramento, com perda de energia que escapa sob forma de calor. Efeito histerese é a perda de energia mecânica sob forma de calor, causada pelo atrito entre as macromoléculas ao serem estiradas e depois, sofrerem retração espontânea (MANO, 2004, p. 76).

A borracha natural e algumas borrachas sintéticas são formadas por polimerização de hidrocarbonetos, são, no entanto, macromoléculas apolares, assim são insolúveis em água e em gases polares, podendo assim ser solúvel em hidrocarbonetos.

Algumas borrachas sintéticas, que pela presença de grupos polares, adquirem característica polar, são insolúveis em gases apolares, e possuem resistência à gasolina e a óleos (MANO, 2004, p. 85,86).

REAPROVEITAMENTO E RECICLAGEM DA BORRACHA

Descartes de pneus; um problema ambiental

Aproximadamente três quartos da borracha natural produzida no mundo são destinados à produção de pneus (VALVERDE, 2007, p. 44).

Todos os dias são fabricados cerca de 2 milhões de novos pneus no mundo. Isto significa uma produção anual de 730 milhões de pneus (janeiro/ 1999). Ao mesmo tempo, hoje são transformados em sucata 800 milhões de unidades por ano.

No Brasil, em 1993, 0,5% do lixo urbano eram pneus velhos e fora de uso. Hoje são descartados no país cerca de 17 milhões de pneus por ano (ACHETUDOEREGIAO, 2008).

Quando um pneu fica muito desgastado, ele é chamado de inservível e torna-se um importante dejetos ambiental. Isso representa um grande desperdício, visto que o pneu inservível ainda possui mais que 90% de sua matéria original.

O descarte de pneus usados se torna um criadouro de insetos e animais que podem ser importantes vetores de doenças. A figura 18 ilustra o descarte de pneus usados.

Figura 16 - Descarte de pneus usados. Fonte (BIANCHI, 2005, p. 642).



Visto que descarte de pneus, é considerado um problema ambiental, a Resolução 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece que os fabricantes e importadores de pneus deverão a cada 4 pneus comercializados dar destinação ambiental correta a 5 pneus a partir de 2006 (BIANCHI, 2005, p. 660).

Reutilização da borracha reciclada.

Para resolver os problemas ambientais dos pneus e ao mesmo tempo aproveitar o material contido nesses dejetos são realizados processos de recuperação e regeneração de pneus (BIANCHI, 2005, p. 660).

Para recuperação e regeneração é necessária a separação da borracha vulcanizada de outros componentes como metais e tecidos. Os pneus são cortados em lascas e purificados por um sistema de peneiras. As lascas são moídas e depois submetidas à digestão em vapor de água e produtos químicos como álcalis e óleos minerais, para desvulcanizá-las. O produto obtido pode ser então refinado em moinhos até a obtenção de uma manta uniforme ou extrudado para obtenção de grânulos de borracha.

A borracha regenerada apresenta duas diferenças básicas do composto original: possui características físicas inferiores, pois nenhum processo consegue desvulcanizar a borracha totalmente, e tem uma composição indefinida, já que é uma mistura dos componentes presentes (ACHETUDOEREGIAO, 2008).

Contudo, existem diferentes maneiras de reutilizar o material contido em pneus usados:

- A trituração de pneus para a fabricação de pó de borracha, que pode ser misturado com borracha virgem para a fabricação de novos artefatos de borracha, como tapetes de carro e solas de sapatos;
- Uso direto de pneus como proteção de construção à beira mar, nos duques e cais; barragens e contenção de encostas, onde são geralmente colocados inteiros;
- A reciclagem energética, em que os pneus são utilizados na geração de calor pela queima. Cada quilograma de pneu libera entre 8,3 a 8,5 kilowatts por hora de energia. Esta energia é até 30% maior do que a contida em 1 quilo de madeira ou carvão. A incineração de pneus é um processo que deve ser realizada de forma muito cuidadosa e controlada, pois, se a temperatura não

for alta o suficiente, haverá a geração de material particulado (fuligem), hidrocarbonetos poliaromáticos e especialmente dioxinas e dibenzofuranos que são agentes carcinogênicos;

- A pirólise, ou decomposição térmica, realizada pelo aquecimento do pneu em atmosfera livre de oxigênio. Nessas condições, o pneu decompõe-se formando produtos gasosos e líquidos que podem ser utilizados como combustíveis;
- A recauchutagem é uma reciclagem muito utilizada de pneus, onde são adicionadas novas camadas de borracha nos pneus sem friso. A recauchutagem aumenta a vida útil do pneu em 40% e economiza 80% de energia e matéria-prima em relação à produção de pneus novos.

Esses são alguns exemplos de como pneus inservíveis, que são detritos ambientais, podem ser transformados em materiais com diferentes aplicações. Certamente, muitos outros processos de reciclagem deverão ser desenvolvidos para transformar a enorme quantidade de detritos de pneus que ainda não têm uma destinação ambiental aceitável. A química certamente terá uma enorme importância nesse contexto (BIANCHI, 2005, p. 660).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desde a descoberta da *Hevea brasiliensis* no Brasil, o país se desenvolveu no plantio e cultivo da seringueira aprimorando as técnicas de obtenção e tratamento do látex evitando a degradação por meio de microrganismos.

A borracha se distingue entre vários materiais poliméricos devido a suas propriedades elásticas, o que proporciona maior diversidade de utilização.

A alta demanda por artefatos causou uma grande evolução na química da borracha, como a descoberta das borrachas sintéticas e de aditivos químicos que garantiram a resistência de suas cadeias poliméricas a altas e baixas temperaturas.

O principal aditivo descoberto foi o enxofre mediante o processo de vulcanização, sendo que aceleradores e ativadores contribuíram para o melhor desempenho do processo. Os aditivos como cargas, antioxidantes e plastificantes proporcionam uma maior durabilidade ao vulcanizado.

Com o avanço tecnológico as perspectivas da borracha no Brasil são positivas. O Brasil, berço do gênero *Hevea brasiliensis*, poderá aumentar significativamente o

cultivo da seringueira por possuir ampla área para plantio. É essencial o empenho em pesquisas no aprimoramento e reciclagem da borracha, visto que o acúmulo de tal resíduo vem causando problemas ambientais.

REFERÊNCIAS

ALLINGER, N. L.; CAVA, M. P.; JONGK, D. C.; JOHNSO, C. R.; LEBEL, N. A.; STEVENS, C. L. **Química Orgânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1976.

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de Química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 3. ed. São Paulo: Artmed, 2007.

BERNARDI, P. H. **Cargas e aditivos em borrachas**. Disponível em: www.eletrica.ufpr.br. Acesso em: 4 ago. 2008.

BIANCHI, J. C. de A.; ALBRECHT, C. H.; MAIA, D. J. **Universo da Química**. 1. ed. São Paulo: FTD, 2005.

CASTRO, D. F.; NENES, R. C. R.; VISCONTE, L. L. Y. SUAREZ, J. C. M. Efeito da ordem de adição de componentes nas propriedades de misturas NR/BR. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 17, n. 1, p. 51-55, 2007.

COSTA, H. M. da.; VISCONTE, L. L. Y.; NENES, R. C. R.; FURTADO, C. R. G. Aspectos históricos da vulcanização. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 13, n. 2, p. 125-129, 2003.

COUTEUR, P. L.; BURRESON, J. **Os Botões de Napoleão**: as 17 moléculas que mudaram a história. 1. ed. Rio de Janeiro: Zahar, 2006.

FERREIRA, M. **Métodos de Análises de Borracha Natural**. 1998. 20 f. Estágio (Estágio em Indústria) - Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos. São Carlos, 1998.

FERREIRA, M. **Caracterização do látex e da borracha natural de seringais de Presidente Prudente/SP**. Tese (Mestrado em Físico-Química) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

GOMES, M. M. **Polímeros, Elastômeros e Borrachas**. Disponível em: www.rubberpedia.com. Acesso em: 27 ago. 2008.

LAROUSSE CULTURAL: Grande Enciclopédia. São Paulo: Plural, 1998.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

MORRISON, R. T.; BOYD, R. N. **Química Orgânica**. 13. ed. Lisboa: Serviço de Educação Fundação Calouste Gulbenkian, 1996.

SANTOS, G. R. dos; MOTHÉ, C. G. Prospecção e perspectivas da borracha natural, *Hevea brasiliensis*. **Revista Analytica**, n. 26, p. 32-40, 2007.

SOLOMONS, T. W. G. **Química Orgânica**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996.

VALVERDE, J. Borracha natural: plantio no país desponta no cenário global. **Revista Química e Derivados**, n. 460, p. 42-50, 2007.

WIKIPÉDIA. **Teatro Amazonas**. Disponível em: www.wikipedia.org. Acesso em: 19 mar. 2008.