



Reciclagem de Resíduos

Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

7 - Reciclagem de Polímeros

Professor Sandro Donnini Mancini

Sorocaba, Maio de 2023.

A palavra polímeros vem do grego: muitas unidades de repetição.

Definição:

Macromolécula composta por muitas unidades de repetição

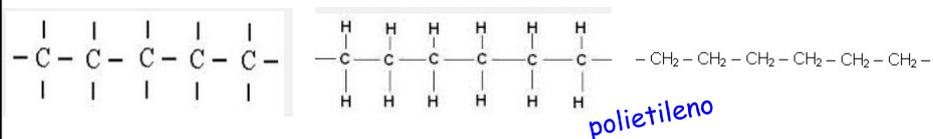
- *1º contato - egípcios e romanos utilizam resinas naturais para vedar contêineres e cartas e até século XVI → usos esporádicos;*
- *1839 - Charles Goodyear descobriu a vulcanização da borracha;*
- *Algodão + ácido nítrico = nitrocelulose (1º polímero semi-sintético);*
- *1912 - Bache: 1º polímero sintético: fenol + formaldeído = baquelite*
- *1928 - Carothers (DuPont): substituto para seda - poliamida: Nylon.*

Polímero	Primeira ocorrência	1ª Produção Industrial	Polímero	Primeira ocorrência	1ª Produção Industrial
PVC	1915	1933	HDPE	1953	1955
PS	1900	1936-37	PP	1954	1959
LDPE	1933	1939	PC	1953	1958
Nylon	1930	1940			

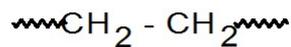
Base dos polímeros: carbono!

Carbono precisa de 4 ligações para entrar em estabilidade.

As ligações entre os átomos de carbono e entre carbono e hidrogênio (ligações intramoleculares) são ligações covalentes e são consideradas ligações fortes.



Representações



polietileno



Uma molécula, estável

Para formar um sólido: várias moléculas

Para compostos de baixo peso molecular formarem polímeros (em reações chamadas de polimerizações), é necessário que estas moléculas tenham capacidade de reagir duas vezes:

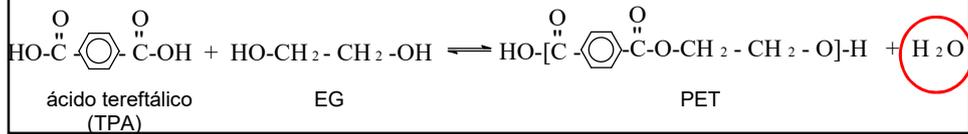
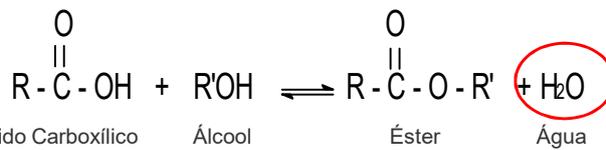
➤ dupla ligação (polietileno, p.ex): → NÃO GERA SUBPRODUTOS



etileno (n)
28 g/mol (gás)

polietileno
~ 28000 g/mol sólido (embalagens, sacarias, etc.)

➤ grupos bifuncionais. → GERA SUBPRODUTOS



Recursos Naturais Renováveis

➤ cana de açúcar;

➤ látex da seringueira (borracha natural)

<https://www.youtube.com/watch?v=UTRWp7usULQ>

Principais

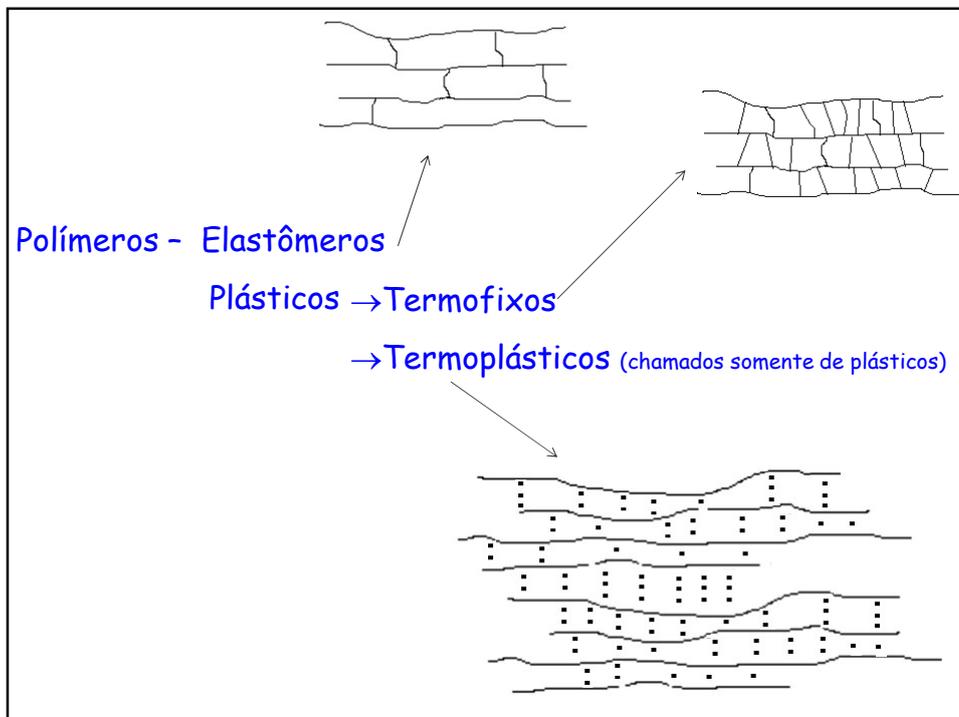
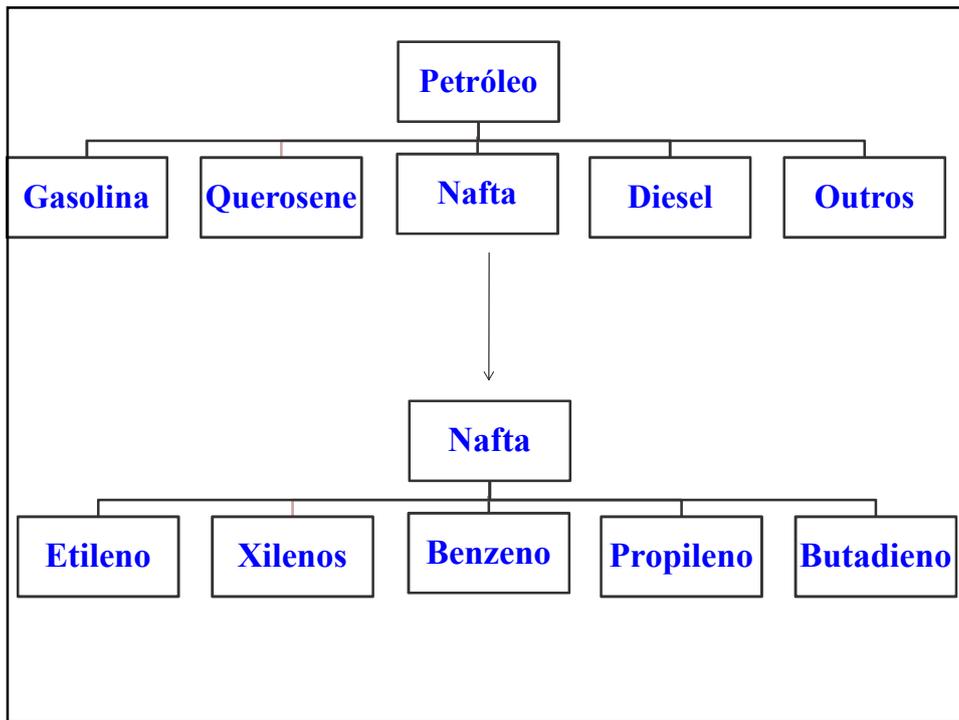
fontes de

matéria-prima

de polímeros

Recursos Naturais Esgotáveis:

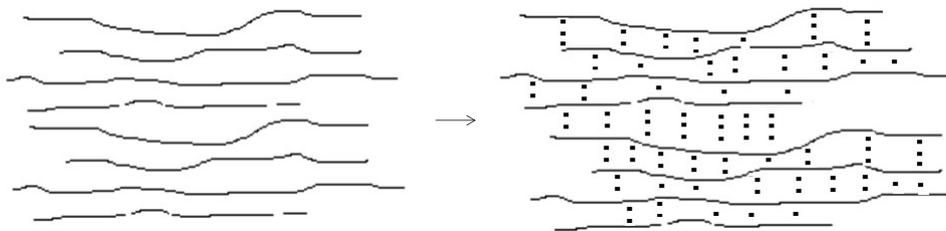
➤ Petróleo.



Mas em situações de estabilidade, como formar um polímero?

 → Uma molécula, estável

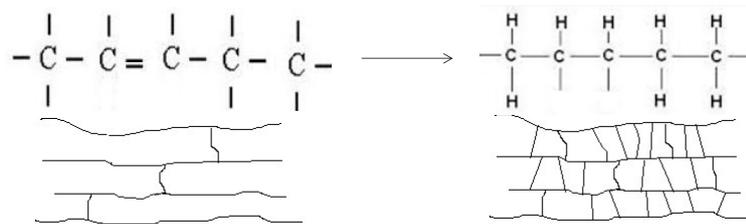
As moléculas se unem umas às outras por meio de ligações secundárias.



Representação de várias moléculas unidas por ligações secundárias formando um termoplástico

Ligações secundárias são fracas, relativamente fáceis de romper. Materiais poliméricos formados somente por ligações secundárias entre as cadeias (ligações intermoleculares) fundem.

Há moléculas poliméricas estáveis que possuem dupla ligação e esta pode ser quebrada, causando ligações primárias -covalentes- intermoleculares (processo também chamado de vulcanização ou cura) para atingir a estabilidade. Em outros casos a dupla atrai reações de vulcanização ou cura para perto de si, mas não é quebrada.



Poucas ligações primárias intermoleculares
Elastômeros (borrachas)

Muitas ligações primárias intermoleculares
Termofixos ou Termorrígidos

Ligações covalentes são fortes, precisam de temperaturas mais altas para romper que as secundárias. Materiais poliméricos que possuem ligações primárias entre as cadeias não fundem, pois a temperatura de destruição da ligação covalente intermolecular é similar à temperatura de destruição da ligação covalente dentro da cadeia principal (intramolecular). Ao alcançar essa temperatura, todas as ligações covalentes se quebram (inter e intra) e o polímero decompõe-se termicamente.

Plásticos - contém como ingrediente básico um polímero sintético e que, embora sejam sólidos à temperatura ambiente em seu estado final, em algum estágio do processamento são moldáveis por ação normalmente conjunta de calor e pressão.

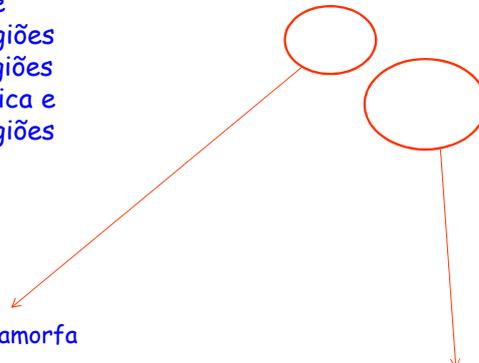
Termoplásticos - podem ser fundidos por aquecimento e solidificados por resfriamento. Quando amolecidos, podem ser transformados em artigos através de moldagem ou extrusão. Exemplos: polietilenos, PP, PVC, PS e o PET.

Termofixos - quando sujeitos a T e P fundem e fluem uma vez, reagem quimicamente (ligações covalentes intermoleculares, não reversível por calor) e se solidificam. Exemplos: baquelite, resina de poliéster insaturado, epóxi, etc.

Fibras - termoplásticos orientados ao longo de uma direção preferencial, o que confere resistência mecânica geralmente superior. Ex: poliéster, viscose, etc.

Elastômeros - possuem uma quantidade relativamente pequena de ligações intermoleculares fortes, que impedem a fusão mas ajudam a explicar a elasticidade, ou seja, o retorno às dimensões originais após a cessão do esforço. Ex: borracha natural, nitrílica, SBR, etc.

Em polímeros geralmente podem existir regiões ordenadas atômica e molecularmente (regiões cristalinas) e/ou regiões não ordenadas atômica e molecularmente (regiões amorfas).



Região desordenada - amorfa

- empilhamento baixo;
- 100% amorfo: transparência
- Tg: mobilidade para cadeias da região - amolece o material.

Região ordenada (cristalina):

- Empilhamento de cadeias (ou parte delas) alto;
- Comportamento ótico = opaco ou translúcido;
- Tm: destrói os cristais, funde o material.

Tabela 7. Tg e/ou Tm de alguns polímeros termoplásticos.

polímero	Tg (°C)	Tm (°C)
HDPE	-36	135
LDPE	-70	115
LLDPE	-60	125
PP	-3	165
PS	100	*
PVC	81	*
PMMA	105	*
PVA	31	*
PET	80	250
NYLON6	40	235
NYLON66	50	265
PTFE (teflon)	-73	325

* não apresenta Tm por ser polímero amorfo

MANRICH, S.; FRATTINI, G.; ROSALINI, A.C. Identificação de Plásticos: uma Ferramenta para a Reciclagem. São Carlos: EDUFScar, 1997.

Elastômeros

O processo de formação de ligações primárias intermoleculares dos elastômeros é chamado vulcanização, normalmente feito a base de compostos de enxofre que aproveitam a instabilidade causada pelas duplas ligações.

Alguns outros polímeros também podem ter boas propriedades elastoméricas.

Consumo mundial das borrachas:

➤ ~60% sintéticas

➤ ~35% natural;

➤ ~5% outros polímeros (outros elastômeros, borrachas termoplásticas etc.)

Borracha natural (NR)

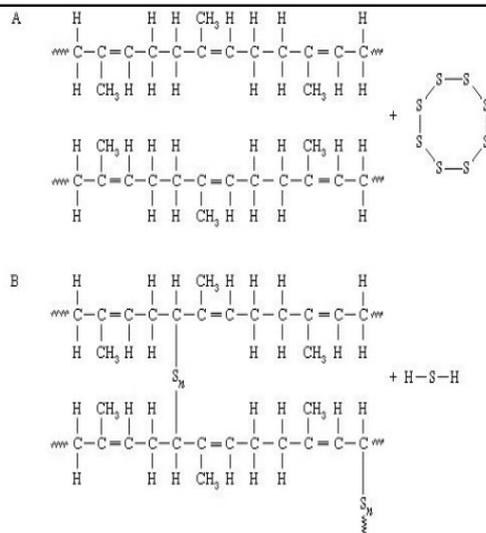
Poli cis-isopreno, produzida a partir do látex da seringueira.

Usada em pneus (banda de rodagem).

Borracha de poliisopreno (IR)

Uma das mais famosas borrachas sintéticas. Possui até 98% de cis-isopreno e é possível formulações que aumentam possibilidades de utilização do produto final.

Usos: pneus, sapatos, etc.



SBR

É a borracha sintética mais consumida, feita a partir da copolimerização de estireno (rígido) com butadieno (flexível).

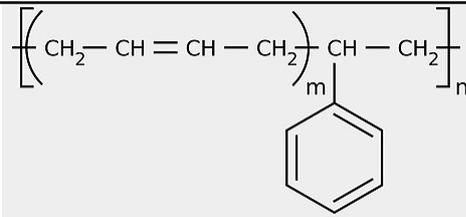
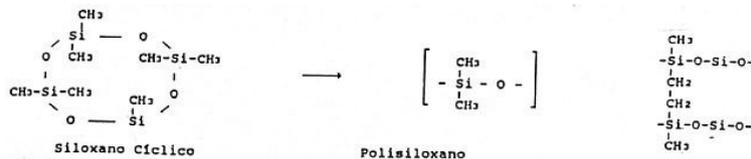


Image courtesy of Luigi Chiesi

Usos: pneus, mangueiras, cabos, correias e outros artigos moldados e extrudados, solas de sapato, etc.

Borrachas de silicone

Polisiloxano vulcanizado com peróxidos, Excelente estabilidade térmica (-80 a 250°C), inércia química, etc. Usos: retentores, isolantes, próteses, colas.



Termofixos

Resina de Poliéster Insaturado

Utilizada como telhas translúcidas, massa plástica e, com reforço de fibra de vidro, na fabricação de assentos de ônibus e metrô, caixas d'água, piscinas, etc. Também vendida como "massa plástica".

Tabla 16-1. Fórmula típica de una resina de poliéster insaturado (Sayre 1959)

Moles	Ingrediente	Libras/100 lb de resina
0,2	Anhídrido ftálico	28,86
0,2	Anhídrido maléico	19,11
0,2	Propilen-glicol	14,33
0,2	Etilen-glicol	12,10
0,3	Estireno	30,00
Trazas	Hidroquinona	0,02
		104,92*

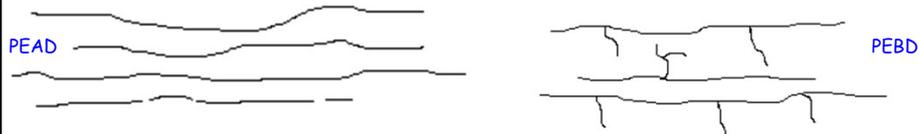
* Durante la esterificación se eliminan unas 5 lb de agua.



Polietilenos

PEAD - linear ou de "baixa pressão"; Densidade: $\sim 0,95 \text{ g/cm}^3$

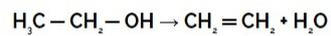
PEBD - ramificado ou de "alta pressão"; Densidade: $\sim 0,92 \text{ g/cm}^3$



PEBDL (LLDPE)

Polietileno linear de baixa densidade; copolímero de etileno e buteno, hexeno ou octeno - alia transparência do LDPE com propriedades mecânicas superiores do HDPE. $\rho \sim 0,92 \text{ g/cm}^3$

Polietileno verde



1 ha terra - 82,5 t cana - 7.200 L etanol \rightarrow 3 t etileno \rightarrow 3 t PE



Polipropileno (PP)

Usos diversos, inclusive embalagens (filmes e rígidas), copos descartáveis (transparentes) etc.

Polipropileno biorientado (BOPP)

Podem apresentar alta transparência.

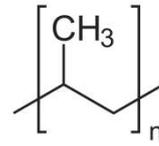
Usado em filmes plásticos, com ou sem tratamento superficial (elétrico ou térmico, também empregados em polietilenos) para permitir impressão ou metalização (deposição de Al sob vácuo).

Usos: adesivos, embalagens etc.

Video tratamento corona ()

Ráfia de Polipropileno (PP)

Fibra de PP que imita fibra de palmeira.



<http://pt.wikipedia.org>





TNT cobrindo plantação de melão

Material base: PP

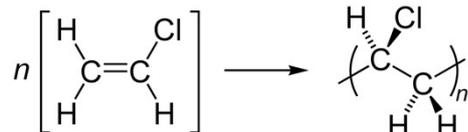
Poli(cloreto de vinila) (PVC)



PVC rígido

Usos: tubos, conexões, forros, embalagens

Problema: cloro



PVC flexível

Plastificantes (ftalatos, adipatos, trimelatos, citratos etc) alojam-se entre as cadeias, diminuindo a Tg.

Usos: recobrimento de cabos, indústria calçadista, pisos, filmes para alimentos.



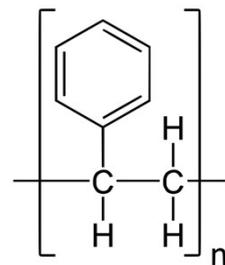
PS - poliestireno

Frágil e transparente .

Ex: canetas "cristal" e capas de CDs.



<http://pt.wikipedia.org>



HIPS - poliestireno de alto impacto

Com pequenas quantidades de borracha (copolímero de estireno e butadieno), melhores propriedades mecânicas porém opaco.

Ex: carcaças de eletroeletrônicos e copos descartáveis (brancos).



Estudo da Unesp-Sorocaba (Valério, P.R., 2014)

Impressora multifuncional

251 peças, 22 materiais diferentes

6 tipos de metais, 3 compósitos, papel, vidro e

11 tipos de polímeros

54,7% da massa da impressora é HIPS

EPS ou Isopor - poliestireno expandido

Aquecimento com vapor d'água e agente expansor forma células que aprisionam o ar. Um isopor típico possui tipicamente 2-3% de polímero e o restante é ar. Gás de expansão: pentano, por exemplo.

<https://www.youtube.com/watch?v=hCIxJhJaMfc> (👁)

ABS - acrinonitrila butadieno estireno

Copolímero

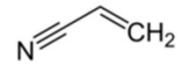
Melhores propriedades que o PS

Maior custo

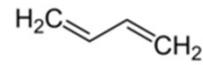
Maior resistência ao impacto

Ex: carcaças de eletroeletrônicos (+ brilhante)

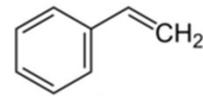
capacetes, legos



acrinonitrila



1,3-butadieno



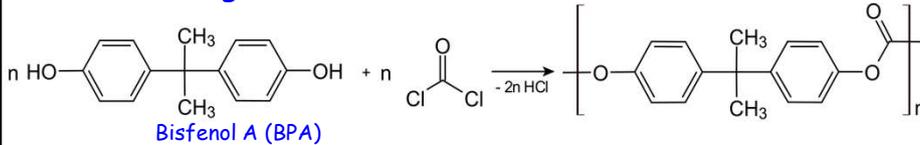
estireno

http://pt.wikipedia.org/wiki/Acrilonitrila_butadieno_estireno

Poliésteres

Policarbonato (PC)

$T_m = 267^\circ\text{C}$; $T_g = 150^\circ\text{C}$; Usos: Coberturas, lentes, CDs etc.



GO BPA FREE™
BABY BOTTLE SAMPLER



<http://pt.wikipedia.org>

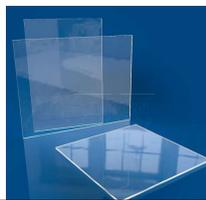
Acrílico

Polimetilmetacrilato (PMMA))

Mais barato e com propriedades mecânicas inferiores ao PC.

T_g = 105°C;

Usos: Lentes, painéis, fibras, preenchimento cutâneo.

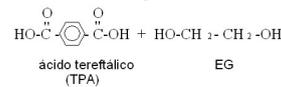
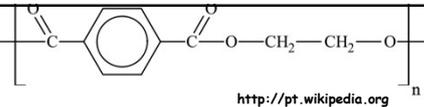


Poli(terefatalato de etileno) (PET)

T_m = 250°C; T_g = 80°C

Usos: Embalagens, fibras etc.

Geralmente produzido a partir da esterificação de ácido tereftálico com etilenoglicol (EG).



Injeção de produtos plásticos - animação

<https://www.facebook.com/watch/?v=1060202631027187>

Injeção de pré-formas - real

https://www.youtube.com/watch?v=rNh_eLfWWNc&t=46s

Sopro de garrafas - animação

<https://www.youtube.com/watch?v=s4B2e47i2hE>

Sopro de garrafas - real

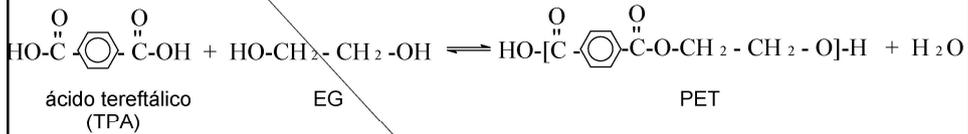
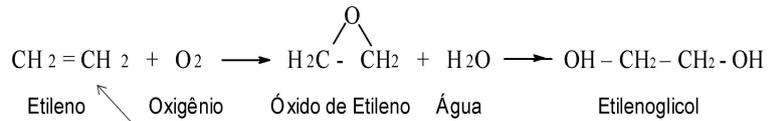
<https://www.youtube.com/watch?v=2Ng9CHs56KA>

Plantbottle - Coca Cola - 2010

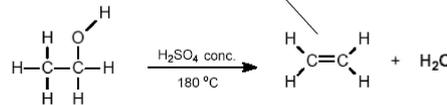
Melaço da cana de açúcar → etanol → etilenoglicol



Monoetilenoglicol (MEG)



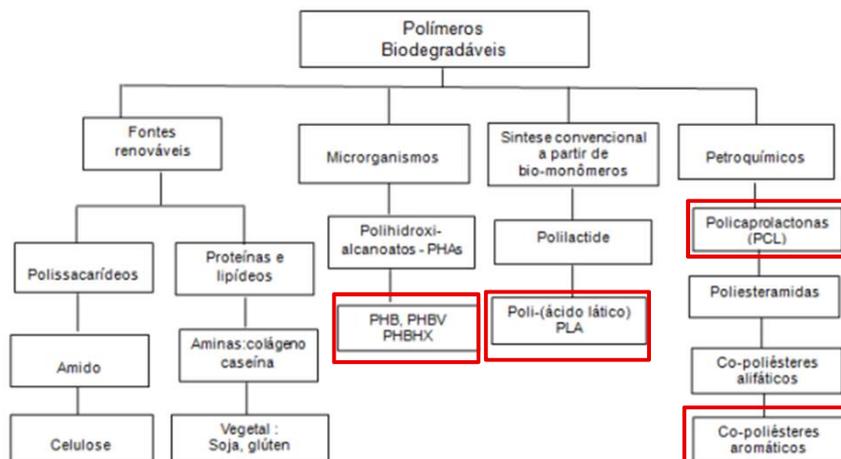
Bio monoetilenoglicol (BIOMEGL)



<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CO NT000fb123vn102wx5eo0sawqe333t7wt4.html>

Polímeros biodegradáveis x Biopolímeros

Biopolímeros são produzidos por seres vivos ou a partir de matérias primas de fontes renováveis, como o polietileno verde. Logo, um biopolímero não é obrigatoriamente biodegradável.



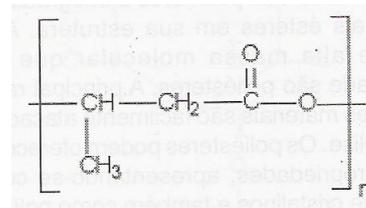
<http://www.uezo.rj.gov.br/tcc/tp/Mauro-C%C3%A2ndido-da-Silva.pdf>

Poliésteres (ou co-poliésteres) biodegradáveis:

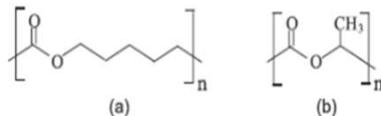
- Sintetizados por bactérias ou quimicamente;
- Degradação: hidrólise e ataque por bactérias aeróbias ou anaeróbias;
- Podem chegar a 100% de biodegradação, decompostos em CO_2 e H_2O .

PHB - poli (β -hidroxibutirato)

$T_g = 5^\circ\text{C}$; $T_m = 176^\circ\text{C}$.



- Propriedades mecânicas geralmente inferiores a polímeros comuns;
- Sintetizado por bactérias (~reserva energética), como a *Alcaligenes eutrophus* (matéria-prima: açúcar) ou quimicamente a partir da β -butirolactona.



Estrutura química de: a) poli(ϵ -caprolactona) (PCL); b) poli(ácido láctico) (PLA)

PCL e PLA - poliésteres biodegradáveis e bioabsorvíveis com propriedades e custos superiores

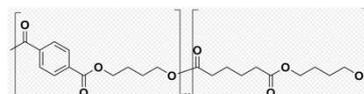
PLA - Poliacido Láctico (ou polilactide)

- o mais promissor para embalagens e aplicações mais comuns;
- molécula derivado do amido
- alta transparência;
- bioaplicações: fixações ortopédicas, suturas

Policaprolactona - preenchimento facial, suturas, medicamentos

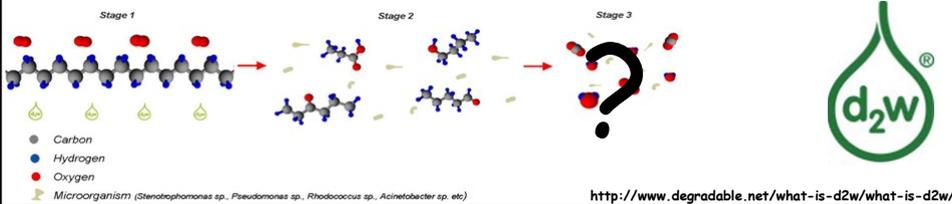
PBAT - copoliéster do ácido adípico, butanodiol e ácido tereftálico

- poli (butileno adipato-co-tereftalato)
- similar ao PEBD, só que biodegradável;
- compostável.



Polímeros Oxibiodegradáveis

- PE ou PP aditivado com sais metálicos e antioxidantes;
- Quantidade de antioxidantes depende da vida útil desejada;
- Conforme antioxidantes são consumidos, oxigênio auxiliado pelos sais atacam a cadeia principal;
- Plástico se "esfarela" e inicia-se a fase de biodegradação;
- Reciclagem é possível se a oxidegradação ainda não começou;
- Bastante controverso: biodegradação não estaria comprovada e só o "esfarelamento" é pior em termos ambientais;
- Aplicação principal: sacolas plásticas.



Microplásticos

- qualquer plástico < 5 mm;
- Microplásticos primários: feitos em escala micro usados em aplicações industriais (abrasivos moderados); boa parte dos plásticos são comercializados nesse tamanho; *microbeads* - esferas abrasivas usadas em esfoliantes e até em cremes dentais.
https://www.youtube.com/watch?v=uAiIGd_JqZc ()
<https://en.wikipedia.org/wiki/Microbead> ()
- Microplásticos secundários: não foram feitos em escala micro, se tornaram assim após uso (incluindo lavagem de fibras sintéticas) e degradação (foto, bio e/ou mecânica);

Fonte de toda o slide:
https://www.sorocaba.unesp.br/Home/Graduacao/EngenhariaAmbienta/SandroD_Mancini/palestra-jdc-unesp.pdf - autoria do Prof. Dr. Walter Ruggeri Waldman, UESCar-Sorocaba



RECICLAGEM DE POLÍMEROS

Tipos de Reciclagem de Polímeros

Reciclagem Mecânica - quando o plástico passa por etapas moagem, lavagem, secagem, aglutinação e reprocessamento, dando origem ao grânulo ou a uma peça. Pode também envolver a aditivação.

Reciclagem Química - quando o plástico passa pela despolimerização visando a destruição da estrutura polimérica, inclusive da cadeia principal. Os produtos finais são intermediários da polimerização, monômeros, hidrocarbonetos e gases.

Reciclagem Energética - quando o plástico passa pela combustão. Os produtos finais são a energia e a emissão gasosa. O plástico não deixa de ser despolimerizado, porém não há a ênfase nos produtos que possam advir da despolimerização, somente na energia desprendida. Muitos autores não consideram a técnica como reciclagem.

Outras definições comuns:

(não 100% aceitas; uma podem ser consideradas sinônimas de outra)

Reciclagem primária - reciclagem mecânica de resíduos limpos, normalmente industriais, auxiliando a obtenção de reciclado com propriedades semelhantes à resina virgem

Reciclagem secundária - reciclagem mecânica de resíduos urbanos e o reciclado possui propriedades inferiores à resina virgem.

Reciclagem terciária - reciclagem química.

Reciclagem quaternária - reciclagem energética.

Downcycling - reciclagem que obtém produtos de propriedades inferiores e aplicações de valor agregado menor que as da resina virgem. O contrário, quando se obtém produtos de maior valor agregado, é chamado upcycling,

Separação de polímeros

Inicialmente, devem ser separados os filmes (sacos e sacolas, espessura menor que 254 μ m) dos produtos rígidos (geralmente todos os que não forem filmes).

Para qualquer tipo de reciclagem a separação por tipo de polímero (no caso de termoplásticos - PET, PE, PP, PVC, PS...) é importante (energética) senão fundamental (química e mecânica).

A reciclagem mecânica conjunta de polímeros diferentes gera produtos com propriedades finais normalmente pobres, pois não há compatibilidade química e física entre eles.

Para poliolefinas (PE e PP) há certa compatibilidade e propriedades finais são razoáveis.

Em alguns casos é possível a reciclagem conjunta (p.ex. PET com HDPE) com o auxílio de agentes compatibilizantes.

Separação de polímeros (rígidos ou filmes) por tipo é feita por identificação no produto, aplicação, características da chama, barulho, densidade etc.

Separação por densidade de termoplásticos comuns

Geralmente em tanque com água (que pode ser o mesmo da lavagem) onde o material moído é despejado. Por exemplo, PET, PS e PVC afundam e PEAD, PEBD e PP flutuam.

Para separar PS e PVC (ou PET) adiciona-se sal na água até um flutuar. Separar PVC do PET não é simples.

Para separar PEAD, PEBD e PP são utilizadas soluções de água com álcool em diferentes concentrações até um afundar.

http://qnesc.sbg.org.br/online/qnesc18/A09.PDF

Polímeros	Densidade / (g/cm ³)
Poli(tereftalato de etileno) PET	1,29-1,40
Poli(etileno) de alta densidade - PEAD	0,952-0,965
Poli(cloreto de vinila) PVC (rígido)	1,30-1,58
Poli(cloreto de vinila) PVC (flexível)	1,16-1,35
Poli(etileno) de baixa densidade - PEBD	0,917-0,940
Polipropileno (PP)	0,900-0,910
Poliestireno (PS) (sólido)	1,04-1,05
Poliestireno (PS) (espuma)	Menor que 1,00

Etanol (% em peso)	Densidade (g/cm ³)	NaCl (% em peso)	Densidade (g/cm ³)	CaCl ₂ ·2H ₂ O (% em peso)	Densidade (g/cm ³)
11	0,98	1	1,004	7,5	1,06
24	0,96	2	1,001	12,0	1,10
36	0,94	4	1,025	17,0	1,15
48	0,92	8	1,054	22,0	1,20
58	0,90	12	1,083	28,0	1,26
66	0,88	16	1,114	32,0	1,30
74	0,86	20	1,145	36,0	1,35
82	0,84	24	1,177	40,0	1,40
*	*	26	1,194	*	*

http://www.institutodopvc.org/reciclagem/base3.htm

Separação automatizada de resíduos

Rhode Island (EUA) (*)

https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=Jda_9_30-WU&fbclid=IwAR1g_zitKE6tBURDMVEagEOPvugd3SG_Hgg_670g5U065HBqS1bFaoJ7aWk

Reciclagem Mecânica de Termoplásticos

Aplica-se para todos os termoplásticos

Moagem → Lavagem → (Aglutinação) → Secagem → Reprocessamento

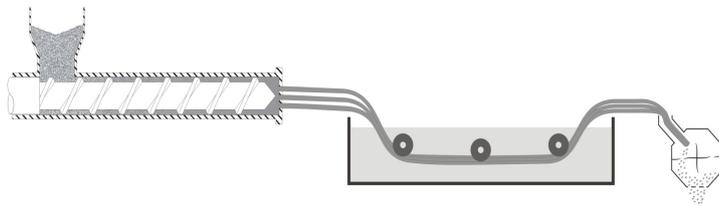
Só com H₂O
sabão, NaOH... → enxágue

Filmes

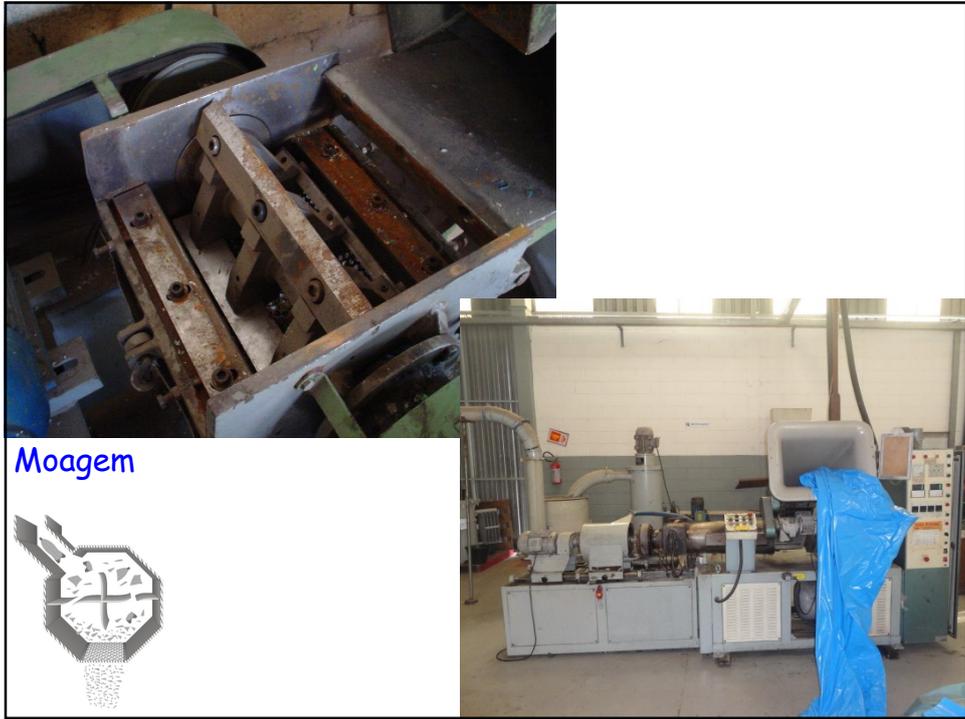
problemas:
PET, nylons



Flocos



Flocos → Fundido → "Spaghetti" → grânulos
ou "pellets"





Encaminhamento para a Lavagem



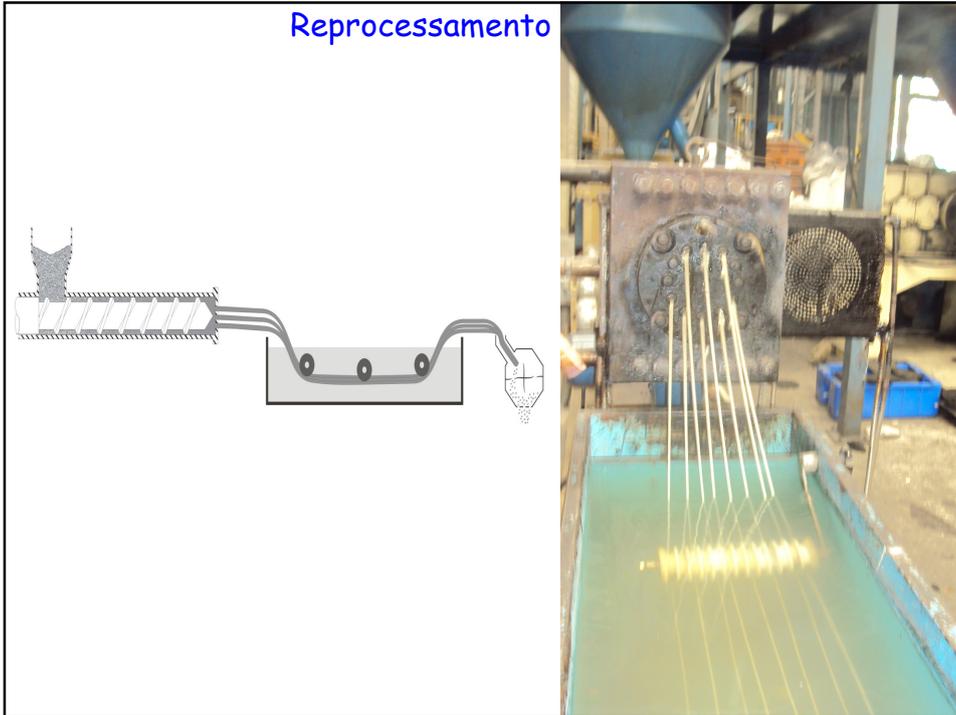
Lavagem



Aglutinação de Filmes



Reprocessamento



Videos sobre reciclagem mecânica de plásticos

Etapas - animação

<https://www.youtube.com/watch?v=TWdUmQKScRY> (*)

Separação manual, moagem, lavagem, secagem e extrusão

<https://www.youtube.com/watch?v=qJwSLrcLPvw> (🕒)

Obtenção de sacos de lixo

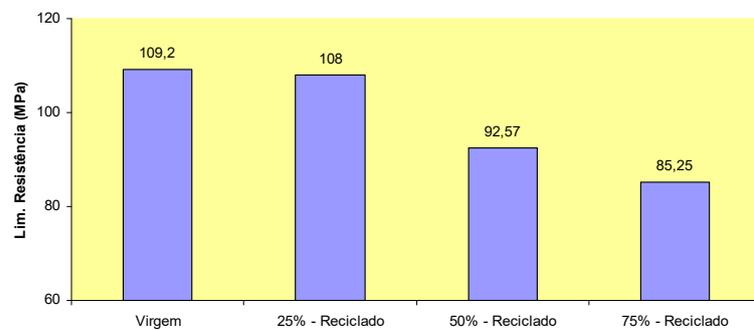
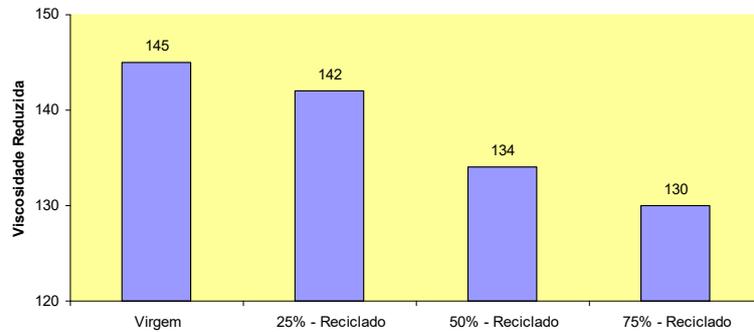
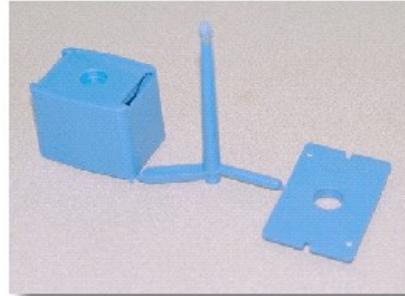
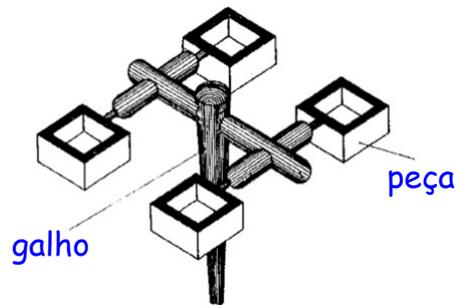
<https://globoplay.globo.com/v/4016855/> (🕒)

A maior fábrica garrafa-a-garrafa do mundo

https://www.youtube.com/watch?v=Ar4BZM_Tzk (🕒)

Reciclagem Mecânica é muito comum em indústrias, especialmente as que injetam peças plásticas.

Deste processo sobram os canais de alimentação ou os "galhos de injeção"



Problema:

Uso, descarte e depois moagem, aglutinação, lavagem, secagem, nova fusão e outros processos vão expor a cadeia principal a:

- esforços mecânicos;
- agentes químicos (água, oxigênio...);
 - Luz;
 - Temperatura



QUEBRA DE LIGAÇÕES = DEGRADAÇÃO

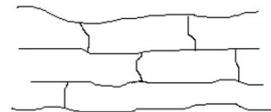


**POLÍMERO RECICLADO TERÁ PROPRIEDADES
DIFERENTES DO POLÍMERO VIRGEM**

57

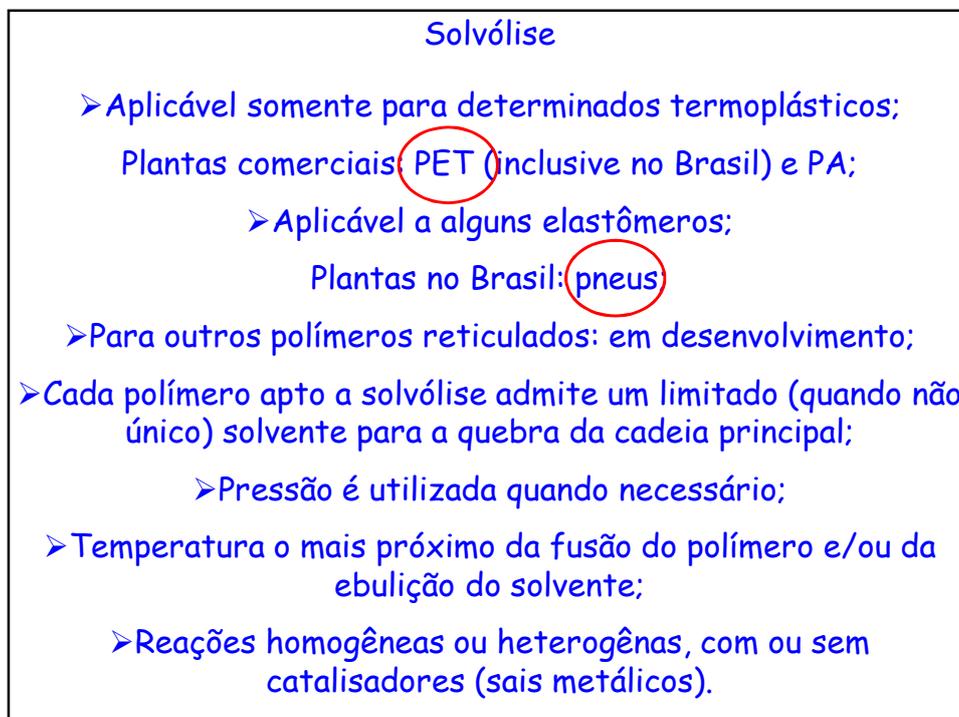
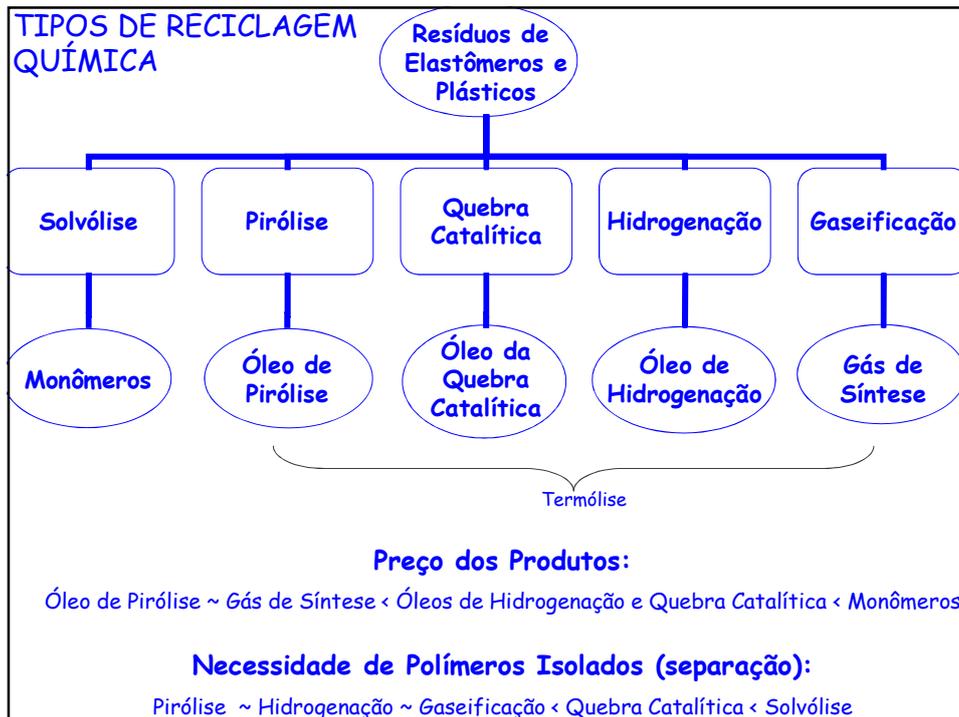
Reciclagem de Borrachas e Termofixos

Estão vulcanizados (curados, reticulados), ou seja, com ligações covalentes intermoleculares.



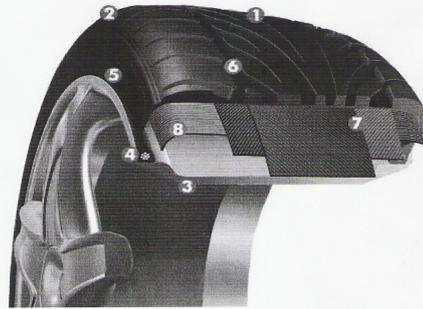
Não fundem: reciclagem mecânica não se aplica como primeira opção.

Pode-se tentar a desvulcanização ou outras formas de quebras de cadeia, para posteriormente aplicar-se a reciclagem mecânica.



CONHEÇA MELHOR O PNEU

Faço-o fundamental para sua segurança.



1 BANDA DE RODAGEM

Parte do pneu que faz contato com o solo, constituída de elastômeros (borracha especial).

2 OMBRO

Local do pneu onde ocorre a junção da banda com a lateral.

3 REVESTIMENTO INTERNO

Superfície interna do pneu constituída de componentes de borracha que têm a função de evitar o vazamento de ar (para pneus sem câmara) e de atenuar o atrito com a câmara quando esta se faz presente.

4 TALÃO

É a parte do pneu constituída de fios de aço, em forma de anéis, recoberta de lonas e elastômeros, que lhe atribui forma apropriada para o correto assentamento do pneu na roda.

5 FLANCO OU LATERAL

É a parte do pneu compreendida entre a banda de rodagem e o talão.

6 SULCO

Cavidades projetadas para evitar deslizamentos laterais, escoar água ou detritos, refrir pneu e gerar tração.

7 CARÇAÇA

É a estrutura resistente do pneu, consti uma ou mais camadas sobrepostas d (camadas de fios de aço, nylon, rayon o materiais com elastômeros que const carcaça do pneu).

8 CINTURA

Representa o feixe de cintas estabilizadoras) que são dimensionad. suportar cargas em movimento e garanti de contato necessária entre o pneu e proporcionando dirigibilidade.

Um pneu típico, como o modelo P195/75R14 para veículos de passeio possui:

2,50 kg de 30 diferentes tipos de borracha sintética;

2,05 kg de 8 tipos diferentes de borracha natural;

2,27 kg de 8 tipos de negro de fumo;

0,68 kg de aço para o cinturão;

0,45 kg de poliéster e nylon;

0,23 kg de arame de aço;

1,36 kg de 40 tipos diferentes de componentes químicos, ceras, óleos, pigmentos, etc.

Reaproveitamento de pneus ainda úteis

Recapagem - nova banda de rodagem

<https://www.youtube.com/watch?v=37ndBYJKt1E> (v)

vulcanização da banda com o pneu antigo: de 2 a 3 horas, de 95-110°C

Recauchutagem - nova banda de rodagem + ombro

Remoldagem - nova banda de rodagem e nova camada de borracha em torno de todo o pneu.

Reaproveitamento de Pneus Inservíveis

Resolução CONAMA 258/99

(destino correto de 5 pneus inservíveis a cada 4 pneus novos)

Resolução CONAMA 416/09

(destino correto a cada pneu novo colocado no mercado de reposição)

Out 2009 - Dez 2010 - ~ 176 mil t pelos importadores (87% da meta)

~ 379 mil t pelos fabricantes 106% da meta)

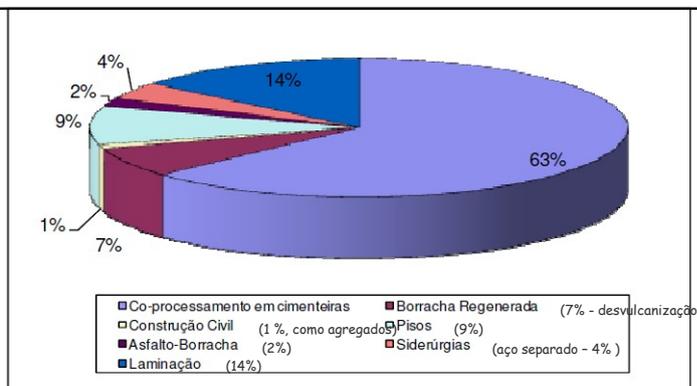
2015 - 450 mil t foram coletados

2017 - 458 mil t foram coletadas (101,78% da meta)

2019 - 471 mil t foram coletadas

2020 - 380 mil t foram coletadas (~ 42.10⁶ pneus de carros)

65
Fonte: <http://www.reciclanip.org.br> - releases



Destinação pelos fabricantes de pneus no Brasil em 2009, por destino.

Lagarinhos, C.A.F.; Tenório, C.A.S. Reciclagem de Pneus Inservíveis: Os Desafios da Logística Reversa no Brasil. In: 11º Congresso Brasileiro de Polímeros, Campos do Jordão-SP, 2011. Anais em CD-ROM. São Carlos-SP: ABPol, 2011.

Co-processamento: cimenteiras, mas também com licor negro e pirólise com xisto

Asfalto-Borracha: cimento asfáltico + pneu moído (agregado) + compatibilizante

Laminação: recorte de peças para composição de pneus, lonas, solados e saltos.

Pisos: pó de pneu + borracha virgem são convenientemente processados e podem se usados em playgrounds, emborrachados...

<https://www.youtube.com/watch?v=Ip7UctGrImQ&t=3s> (*)

66

OBTENÇÃO DE BORRACHA REGENERADA A PARTIR DE PNEUS

Inicia-se com a desvulcanização*:

1) Mistura do pneu moído à óleo (inchamento)

Para pneus: parafínicos, naftênicos e aromáticos



2) Ataque Químico**

Para pneus: Difenilsulfeto, cloreto ferroso de fenil hidrazina, sal de butilamina tiofenol, ortodichlorobenzeno e oxigênio

Após a desvulcanização, tenta processar como termoplástico (moldagem por compressão, p.ex., para fabricação de tapetes de carro)

<https://www.youtube.com/watch?v=XhLLqyu0O5w> (🎥)

*Usa-se o termo desreticulação para outros polímeros que não borrachas, mas a ideia é a mesma e as etapas tem a mesma função;

** Há outras formas de quebrar as cadeias, como drais e extrusão reativa.

Reciclagem de PET no Brasil:

➤ Brasil, 2021: reciclou 359 mil t de PET, ou seja, 56,4% da produção, que alcançou 636 mil t.

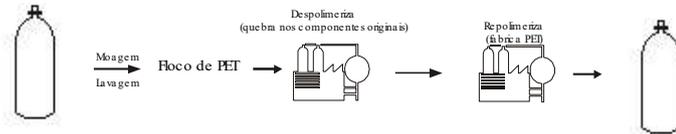


<https://abipet.org.br/publicacoes/>

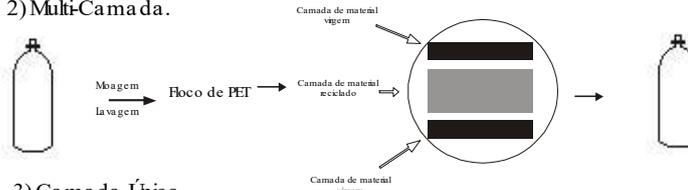
Reciclagem de polímeros visando contato direto com alimentos

Bottle-to-bottle

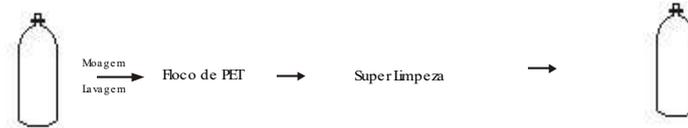
1) Despolimerização



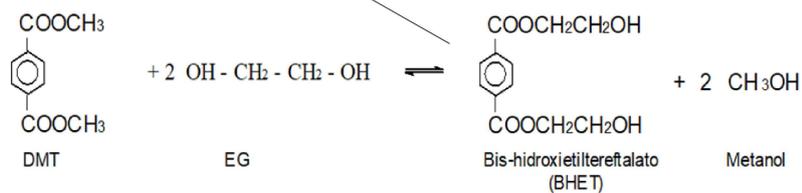
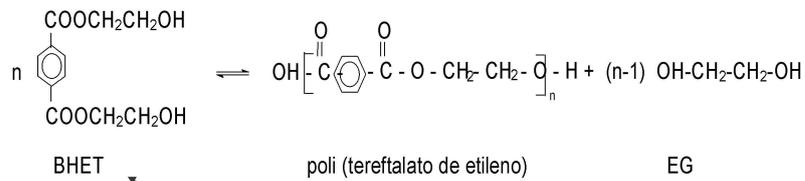
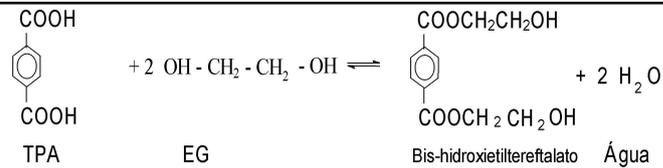
2) Multi-Camada.



3) Camada Única



PET



Possibilidades de Reciclagem Química de PET

Hidrólise - obtenção de TPA e EG

Metanólise - obtenção de DMT e EG

Glicólise - com Etilenoglicol: obtenção de BHET e EG

com Propilenoglicol: obtenção de resina insaturada

com glicerol: obtenção de resina alquídica



Prática relativamente comum na indústria têxtil.

Plantas no Brasil para garrafas para fabricação de massa plástica e tintas.

Reciclagem Química de PET no Brasil:

➤ Brasil, 2021: reciclou quimicamente 47 mil t de PET (13% do total), para a fabricação de resina insaturada e alquídica;



<https://abipet.org.br/publicacoes/>

PET como matéria prima para obtenção de Resina de Poliéster insaturado

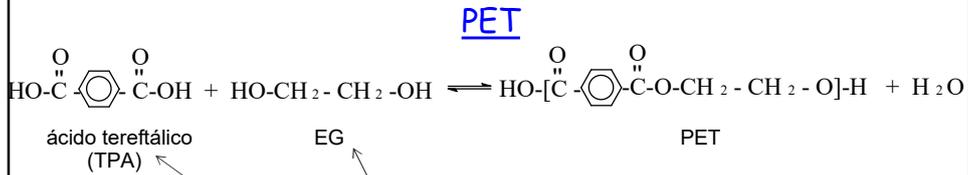
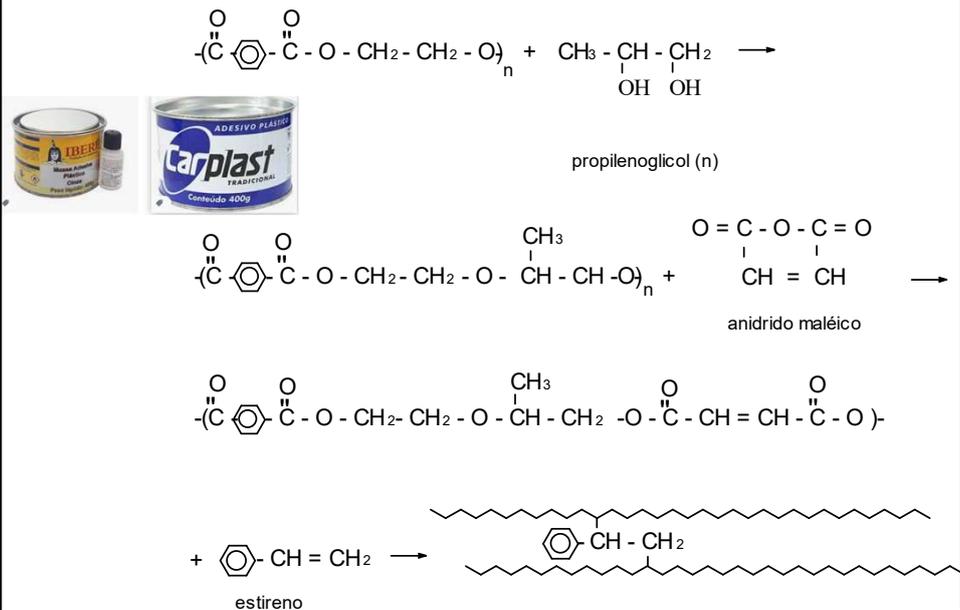


Tabla 16-1. Fórmula típica de una resina de poliéster insaturado (Sayre 1959)

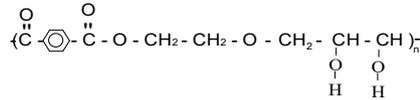
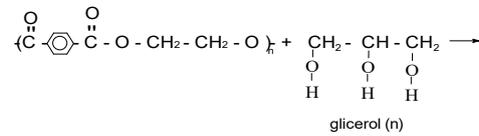
Moles	Ingrediente	Libras/100 lb de resina
0,2	Anhídrido ftálico	28,86
0,2	Anhídrido maléico	19,11
0,2	Propilen-glicol	14,33
0,2	Etilen-glicol	12,10
0,3	Estireno	30,00
Trazas	Hidroquinona	0,02
		104,92*

* Durante la esterificación se eliminan unas 5 lb de agua.

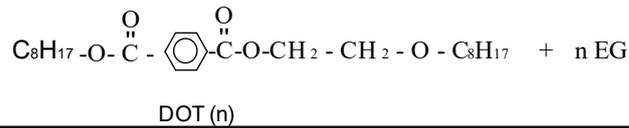
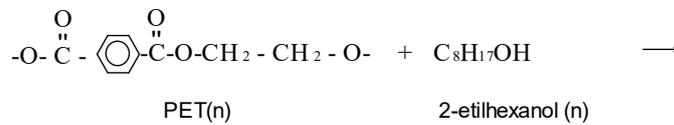
PET como matéria prima para obtenção de Resina de Poliéster insaturado



PET como matéria prima para obtenção de Resinas Alquídicas



PET como matéria prima para obtenção de plastificante



Reciclagem Energética (polímeros como combustíveis)

Calorific values of plastics compared with conventional fuels.

Fuel	Calorific value (MJ/kg)
Methane	53
Gasoline	46
Fuel oil	43
Coal	30
Polyethylene	43
Mixed plastics	30-40
Municipal solid waste	10

Compósito com 30% Epóxi + 70% fibra de vidro = 9-18

Co-processamento em cimenteiras: pneus

https://www.researchgate.net/publication/227421226_Thermolysis_of_waste_plastics_to_liquid_fuel_A_sustainable_method_for_plastic_waste_management_and_manufacture_of_value_added_products--A_world_prospective

Table 3 Economic data related to plastic recycling in Brazil in 2018 and 2019 [76]

	Unit	2019	2018
Plastic recycling industries	Number	695	716
Direct jobs	Number	17,919	18,662
Revenue	US\$	454,000,000	436,000,000
Installed capacity	Tonnes	1,848,000	1,802,000
Excess capacity	%	38	39
Amount of plastic consumed in recycling	Tonnes	1,320,000	1,230,000
Amount of recycled plastic produced	Tonnes	838,000	757,000
Amount of plastic waste generated	Tonnes	3,500,000	3,430,000
Recycling rate	%	24.0	22.0

Table 4 Information about plastic waste recycled in Brazil in 2019 [77]

	%
Type of waste	
Pre-consumer (industries)	28.0
Post-consumer (households)	52.5
Post-consumer (not from households)	19.5
Source of waste	
Industries	28.0
Scrap dealers	26.0
Processing industries	17.0
Waste pickers' cooperatives	12.0
Waste management companies	8.0
Informal waste pickers	4.0
Direct from source	3.0
Open dumps	2.0
Brazilian region where the waste was generated	
Southeast	48.5
South	27.5
Northeast	12.0
Middle-west	6.0
North	4.0
Imported from other countries	2.0