PESQUISA

Siderúrgicas são o novo espaço para reciclagem energética de plásticos pós-consumo

Antonio Augusto Gorni

O consumo acelerado e o descarte de plásticos usados em aplicações efêmeras, particularmente na fabricação de embalagens, está levando a um alarmante acúmulo de materiais de difícil decomposição em depósitos de lixo. O processamento desse rejeito como combustível em altos-fornos ou coquerias é uma contribuição que se revela cada vez mais importante para a solução do problema. Este trabalho faz uma revisão sobre a utilização desse procedimento em siderúrgicas estrangeiras, apontando as suas vantagens e as condições que tiveram de ser satisfeitas para que ele fosse bem sucedido.

O autor (agorni@iron.com.br) é analista de processos da Companhia Siderúrgica Paulista (Cosipa), em Cubatão (SP), e editor técnico da Revista Plástico Industrial. Este artigo foi apresentado como palestra na edição de 2004 do congresso PlastShow – Soluções para a Indústria do Plástico, realizado entre 27 e 29 de abril em São Paulo (SP).

O consumo de plásticos vem aumentando há décadas, em uma clara demonstração do enorme sucesso conseguido por esse material nas mais variadas aplicações, conforme mostrado na figura 1[1]. As características típicas dos plásticos, como o seu custo praticamente irrisório, baixo peso, boa resistência mecânica, impermeabilidade, transparência e capacidade de coloração e/ou impressão conferiram-no trunfos irresistíveis para o seu uso em grandes quantidades na forma de embalagens, uma aplicação extremamente importante em uma sociedade voltada ao consumo. Portanto, nada mais natural do que esses materiais avançarem sobre esse mercado: do total de 3,97 Mt de plásticos consumidos no Brasil em 2002, nada menos do que 1,58 Mt foi usada na forma de embalagens e 0,46 Mt como outros tipos de produtos descartáveis. Ou seja, só naquele ano, mais de dois milhões de toneladas de artigos plásticos tiveram vida útil efêmera no Brasil. Dito em outras palavras: pelo menos 51,3% do plástico consumido no País naquele ano foi para o lixo após algumas semanas de uso, se tanto. Obviamente, deve-se juntar a essa quantidade o material plástico que chegou ao fim de sua vida útil em outras aplicações mais duradouras como, por exemplo, componentes para automóveis, eletrodomésticos, móveis, etc.

Esses dados são espantosos, mas a situação é ainda mais surpreendente nos países ditos desenvolvidos. No Japão, por exemplo, 86,4% dos 11 milhões de toneladas de resinas plásticas consumidas em 2001 foram descartadas. Isto representa uma geração de 9,5 milhões de toneladas de lixo. E apenas 39% desse total (3,7 milhões de toneladas) foram reaproveitadas pelas várias abordagens de reciclagem: recuperação do material, tratamento químico ou queima. O restante – 5,8 milhões de toneladas – foi simplesmente abandonado em depósitos de lixo[2].

Não é novidade alguma que essa enorme geração de rejeitos, uma conseqüência direta de nossa sociedade afluente, venha gerando problemas ambientais realmente sérios. Como se sabe, a degradação do lixo plástico abandonado é extremamente lenta, podendo levar décadas ou mesmo séculos, gerando um justificado temor sobre um futuro abarrotado de enormes montanhas do chamado "lixo branco". O diagrama de Ashby mostrado na figura 2[3] explica o motivo desse

problema: polímeros são materiais com média ou baixa reciclabilidade, basicamente porque o custo de sua recuperação geralmente é superior ao da obtenção da matéria-prima virgem. Além disso, dificilmente a resina reciclada apresenta as mesmas características relativas à qualidade típicas do material virgem.

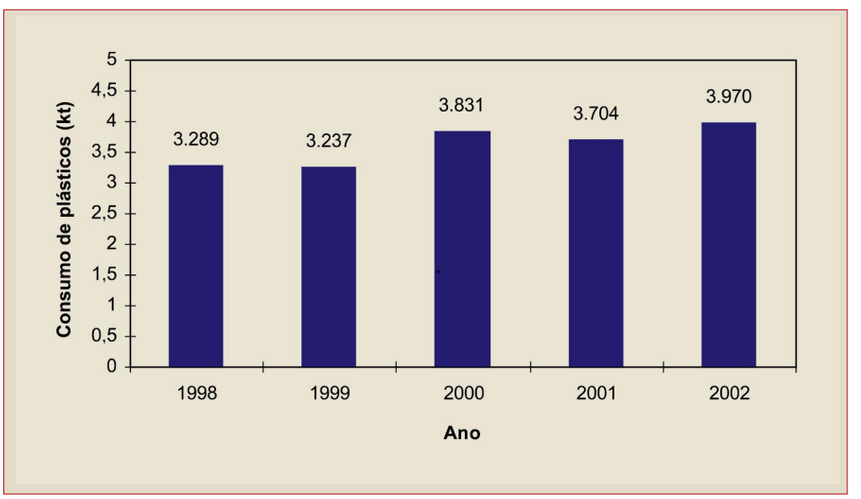

Fig. 1 – Consumo total de plásticos no Brasil entre 1998 e 2002[1]

O PE é a resina mais reciclada, sendo seguida por PS e PP. A seguir, aglomeram-se numa posição intermediária diversas resinas (PET, PC, PA, PVC, PMMA e ABS). Por outro lado, como mostra esse mesmo diagrama, resinas termofixas e borrachas praticamente não são recicladas. Como se sabe, esses materiais decompõem-se antes de se fundir, devido à sua estrutura de ligações covalentes cruzadas. Este fato dificulta enormemente seus processos de recuperação. Já os metais lideram o *ranking* dos materiais recicláveis, seguidos de perto pelos vidros. Não é a toa que um dos principais argumentos usados pela indústria metalúrgica na promoção de seu produto é o seu alto índice de reaproveitamento, algo que já ocorre há décadas na siderurgia e que mais recentemente se tornou um retumbante fato na indústria do alumínio.

Portanto, se se deseja manter o plástico como material viável em um futuro próximo, é necessário encontrar alternativas para uma recuperação racional dos descartes desse tipo de material, particularmente dos resíduos pós-consumo, cujas características de qualidade geralmente são bastante ruins. Já foram propostas diversas soluções para o processamento dos rejeitos de material plástico, as quais se encontram classificadas abaixo, em ordem decrescente do ponto de vista de sua eficiência energética e redução do impacto ambiental[12].

- reutilização do próprio componente descartado;
- reutilização da resina;
- despolimerização da resina, obtendo-se o monômero original;
- decomposição da resina em outras matérias-primas que não o seu monômero;
- queima.

A escolha da melhor solução a ser dada ao plástico pós-consumo depende de uma série de considerações, as quais dependem do produto em questão e da resina com que ele foi feito. Devem ser considerados aspectos ligados à viabilidade técnica e comercial, logística e legislação sanitária, por exemplo.

O caso das embalagens é particularmente crítico dado o seu baixo valor agregado, o alto volume e a qualidade geralmente inaceitável do material reciclado a partir delas. Sua coleta a partir de lixões é bastante inconveniente, afinal, trata-se de material contaminado, sem referências sobre sua origem, de difícil identificação e cujo transporte até um possível reciclador pode ser inviável. Nota-se, por exemplo, que a quantidade de terra e sujeira que um potinho de iogurte usado pode conter é muito maior do que a massa de resina recuperável que pode ser obtida a partir dele.

Tab. 1 – Comparação entre as análises químicas de carvão pulverizado, óleo e sucata plástica[10]

% em peso	Agente redutor		
	Carvão	Óleo	Plástico
C	79,60	85,90	83,74
H	4,32	10,50	12,38
S	0,97	2,23	0,05
Cinzas	9,03	0,05	3,08
Cl	0,20	0,04	0,75
Pb	0,0050	0,0001	0,0002
Cr	0,0013	0,0002	0,0013
Ni	0,0028	0,0075	0,0011
V	0,0045	0,0600	0,0002
Zn	0,0065	0,0001	0,0073
Cu	0,0015	0,0001	0,0013
K	0,2656	0,0010	0,0170
Na	0,0816	0,0010	0,0200

Os exemplos bem-sucedidos já disponíveis sobre a reciclagem de rejeitos plásticos pós-consumo mostram uma série de características próprias que garantiram a sua viabilidade. A partir de 1990, os governos do Japão e da Alemanha promulgaram severas leis ambientais transferindo a responsabilidade pelo reprocessamento dos rejeitos plásticos aos produtores e transformadores de resinas[6, 7,10]. Simultaneamente foram tomadas diversas outras medidas para viabilizar a reciclagem dos plásticos e reduzir os custos a ela associados. As embalagens e peças de plástico precisam agora ter uma codificação indelével que permita sua fácil identificação. A coleta seletiva do

lixo permite uma pré-identificação dos materiais e a sua deposição em locais adequados, evitando a mistura e a contaminação. A mera deposição de plástico em lixões foi proibida. Foi criada toda uma estrutura para a classificação e embalamento dos rejeitos de plástico, facilitando a recuperação posterior.

Obviamente, todo esse processamento implica num custo, o qual está sendo coberto por taxas pagas pelas empresas que fazem uso de embalagens plásticas ou pelas taxas de lixo pagas pelas moradias atendidas pelo sistema de coleta. O problema é que boa parte desse plástico recolhido é constituída de resinas muito baratas, tais como PE, PP ou PS, cujo reaproveitamento como material tende a ser inviável economicamente, dado o preço baixo da resina virgem a qual, além disso, geralmente apresenta melhores propriedades.

Outra frente desta batalha está na recuperação de bens duráveis sucatados. Um caso emblemático é o dos automóveis. A legislação européia impõe que este ano pelo menos 85% dos automóveis sejam reciclados e que gerem, no máximo, 15% em peso de resíduos não recuperáveis. Em 2015 esses percentuais passarão a, respectivamente, 95% e 5%. Um ponto importante a ser notado aqui é que um automóvel médio, ao ser sucatado, gera aproximadamente 100 quilos do chamado "resíduo automotivo leve", uma mistura de diversas resinas provenientes dos componentes plásticos do veículo, geralmente constituída de 24% de PP, 10% de PU, 8% de PE e uma miscelânea de outros polímeros. Em 1996 a reciclagem de automóveis gerou 500 mil toneladas desse resíduo e estima-se que em 2015 essa quantidade suba para 850 mil toneladas. Lamentavelmente esse resíduo também não se presta para ser aproveitado novamente como matéria-prima[4]. Uma abordagem similar também está sendo proposta no Japão para os aparelhos eletrodomésticos[6].

Sobram como alternativas para a reciclagem desse material o seu reprocessamento químico ou a queima como combustível. Mas há também uma nova abordagem, mais vantajosa do ponto de vista ambiental e energético: o uso do plástico como combustível e meio redutor em altos-fornos siderúrgicos ou como matéria-prima coqueificável.

Tab. 2 – Especificações técnicas recomendadas para a sucata de plástico pós-consumo a ser inserida nos altos-fornos da Stahlwerke Bremen[10]

Parâmetro		Valor recomendado
Tamanho de partícula (mm)		< 10
Fração de finos menor do que 250 mícrons (%)		< 1
Densidade geral (t/m³)		> 0,3
Características de fluxo pneumático		Boas
Composição química (%)	Umidade residual	< 1
	Cloro	< 2
	Cinzas	< 4,5
	Metais	< 3
	Total de plástico	> 90
	Total de poliolefinas	> 70
	Plásticos de engenharia	< 4

Uma análise do material plástico reciclado na Alemanha em 1996 mostrou que apenas uma pequena fração dos rejeitos apresentava pureza suficiente para ser reaproveitada pela recuperação exclusiva como matéria-prima. De fato, a reciclagem de filmes em novos filmes, cabos e tubos, e a de garrafas em novas garrafas, respondeu pela recuperação de respectivamente 27 e 9% do material reciclado. O grau de pureza obtido foi de respectivamente 95 e 99%. Cerca de 61% do plástico recolhido para reciclagem foi uma mistura de resinas que não permitia um aproveitamento nobre, uma vez que apresenta pureza de apenas 88,6%. Contudo, ela pode ser reciclada de forma alternativa gerando energia e calor pelo processamento em alto-forno, por termólise, hidrogenação e gaseificação em leito fixo ou fluidizado. Os 3% restantes mostraram-se impuros demais para essas abordagens, restando apenas sua reciclagem energética por incineração[10].

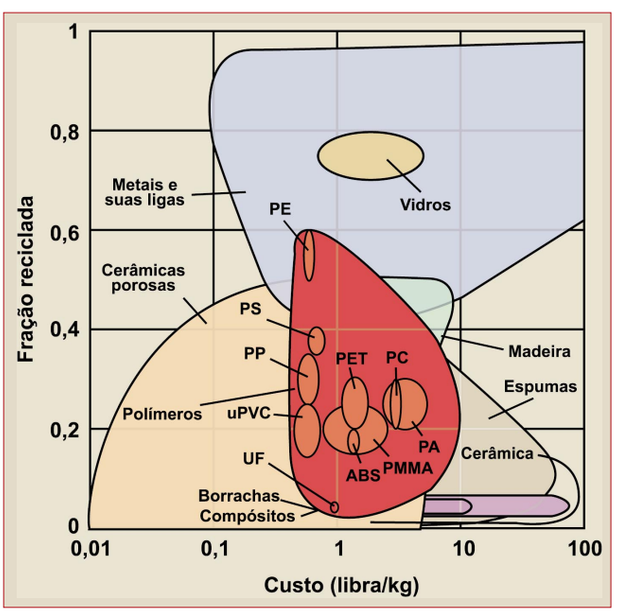

Fig. 2 – Diagrama de Ashby mostra a relação entre os preços dos diversos materiais de engenharia e as suas frações recicladas[3]

O plástico como substituto do carvão pulverizado em altos-fornos

Como se sabe, um alto-forno tem como objetivo principal extrair o ferro metálico a partir de seu minério. Isso é conseguido fazendo uma corrente de ar aquecido passar em contra-corrente por uma carga constituída de minério de ferro, coque e calcário que vem descendo pelo forno. Esse processo está mostrado de forma esquemática na figura 3. O ar aquecido é insuflado na região inferior do forno através de ventaneiras. O carbono presente no coque tem por objetivo se combinar com o oxigênio do minério, de forma a liberar o ferro metálico e gerar o calor necessário para as reações metalúrgicas e a fusão do metal obtido. O ferro assim extraído se deposita no estado líqüido no fundo do alto-forno, apresentando-se na forma de ferro-gusa, ou seja, ferro contendo 4% de carbono e outros elementos, tais como manganês, silício, fósforo e enxofre, entre outros. O calcário está presente para gerar uma escória líqüida que sobrenada o banho de metal líqüido, criando um meio que absorverá as impurezas do minério e evitando que contaminem o gusa. O gás obtido após a passagem do ar pela carga de minério, coque e fundentes sai pela parte superior do forno, sendo lavado e usado como combustível para aquecer o ar usado no próprio alto-forno e também em outros fornos da usina siderúrgica integrada.

Uma das formas de se elevar o desempenho dos altos-fornos consiste na injeção de finos de carvão ou óleo diretamente na região onde o ar quente é insuflado no alto-forno siderúrgico. Esses materiais são ricos em carbono e complementam a oferta desse elemento ao processo de redução do minério.

A comparação entre as análises químicas do carvão, óleo e sucata plástica mostra que elas são bastante similares, conforme se pode observar na tabela 1[7,10]. Logo, em tese, também a sucata plástica pode ser introduzida em altos-fornos no lugar do carvão pulverizado ou do óleo. Esta similaridade animou os especialistas alemães e japoneses a propor o estudo do processamento da sucata plástica e resíduo automotivo leve em altos-fornos e coquerias. A princípio, esse conceito é bastante interessante. Contudo, diversos obstáculos tiveram de ser vencidos para que ele fosse plenamente viabilizado.

Em primeiro lugar, é necessário criar incentivos para que as siderúrgicas se disponham a processar resíduos plásticos em seus equipamentos. Afinal, a prática operacional da injeção de carvão pulverizado ou óleo em altos-fornos está plenamente consolidada do ponto de vista técnico e econômico. Então, para que mudar? E, como será visto mais adiante, a sucata plástica não é um material totalmente adequado para uso em alto-forno. É preciso algo mais para convencer as usinas siderúrgicas a ajudar a viabilizar um material que, ainda por cima, já se mostrou ser perigosamente competitivo para seu próprio produto. No Japão e na Alemanha isso foi conseguido com vários incentivos às siderúrgicas que se dispuseram a processar a sucata plástica:

- concessão de créditos ambientais;
- pagamento pelo serviço;
- melhoria da imagem pública.

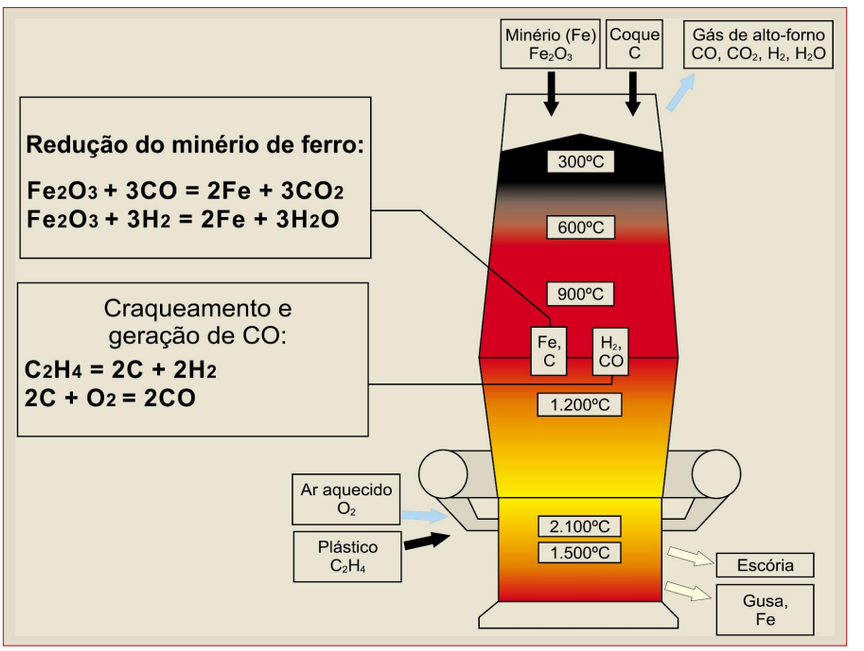

Fig. 3 – Reações químicas fundamentais em um alto-forno siderúrgico[10]

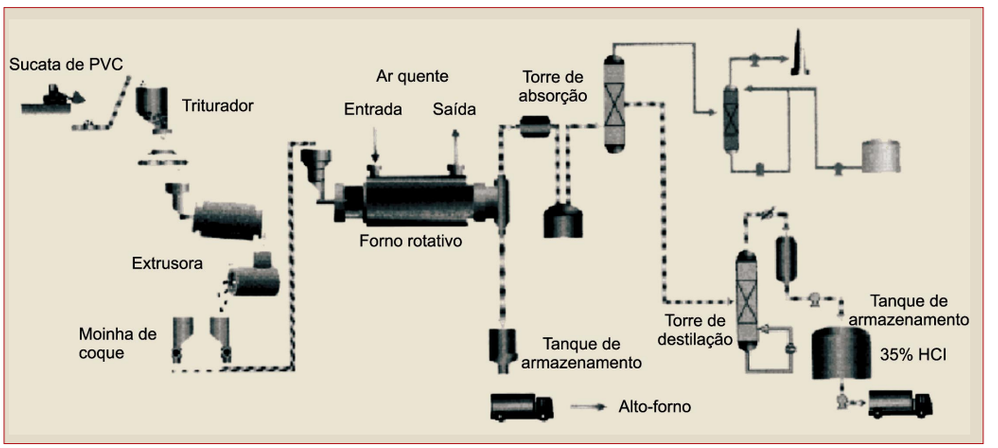

Fig. 4 – Equipamento usado para extração de cloro da sucata de PVC, permitindo o seu uso seguro como material para introdução em altos-fornos. O cloro é recuperado na forma de ácido clorídrico[6]

Outro aspecto muito importante está em garantir o fornecimento consistente de sucata plástica às siderúrgicas que se disponham a consumi-lo. Portanto, é necessário criar toda uma estrutura logística que agilize a coleta e o transporte dos resíduos plásticos desde os pontos de sua geração até as usinas siderúrgicas, reduzindo também os seus custos.

Do ponto de vista técnico há diversos aspectos que devem ser considerados ao se inserir sucata plástica em altos-fornos. Em primeiro lugar, por se tratar de material pós-consumo, a composição química da sucata plástica obtida inevitavelmente irá variar aleatoriamente ao longo do tempo, ao sabor do que será descartado pela população. As flutuações dos teores de carbono e hidrogênio desse material alteram o seu poder calorífico, fato que pode perturbar o balanço térmico dos altos-fornos e a condução de sua operação, precisando ser compensado com a suplementação ou redução do fornecimento de outros tipos de combustíveis ao reator. Uma maneira possível de reduzir essa

Tab. 3 – Principais parâmetros operacionais dos altos-fornos da usina siderúrgica japonesa NKK antes e depois da implantação da introdução de sucata plástica[13]

Parâmetros	Condição normal	Com introdução de plástico
Vazão de injeção (kg/t)	-	3
PCI (kg/t)	72	73
Taxa de coque (kg/t)	473	468
Taxa de combustível (kg/t)	545	544
Produção de gusa (t/d)	10.600	10.638
Temperatura do gusa (°C)	1.520	1.518
CO no gás de topo (%)	26,3	26,5
CO_2 (%)	21,5	21,3
H_2 (%)	3,4	3,7
Volume de gás de topo (Nm^3)	1.758	1.778
Valor calorífico do GAF (kJ/Nm^3)	3.732	3.757

variação pode ser o consumo de aparas e rejeitos plásticos provenientes de empresas que processam essa sucata, caso em que há garantia da identificação do material descartado. Por outro lado, geralmente esse tipo de rejeito, limpo e identificado, pode ser reaproveitado com sucesso no próprio transformador de resinas plásticas[13].

Outro problema bastante sério é a presença de PVC na sucata plástica. Essa resina contém cloro, o qual é liberado durante a queima e agregado na forma de ácido clorídrico (HCl) ao gás que o alto-forno gera em sua operação. Esse gás é posteriormente usado na própria usina siderúrgica como combustível. Tal contaminação torna o gás mais corrosivo, provocando ataque às tubulações e aos queimadores. Na Alemanha se optou por trocar os equipamentos que entram em contato direto com o gás de alto-forno (GAF), tornando-os mais resistentes à corrosão por HCl[7]. Já as usinas japonesas decidiram banir o uso de PVC nos altos-fornos, sendo essa resina separada dos rejeitos plásticos por flotação. Estão sendo desenvolvidos estudos específicos para definir como será o pré-tratamento dessa resina antes de sua inserção no alto-forno. A alternativa mais promissora está mostrada esquematicamente na figura 4. Esse plástico deverá ser submetido a um processo de carbonização que consiste no aquecimento do PVC entre 300 e 400°C na ausência de oxigênio. Isto elimina o cloro presente

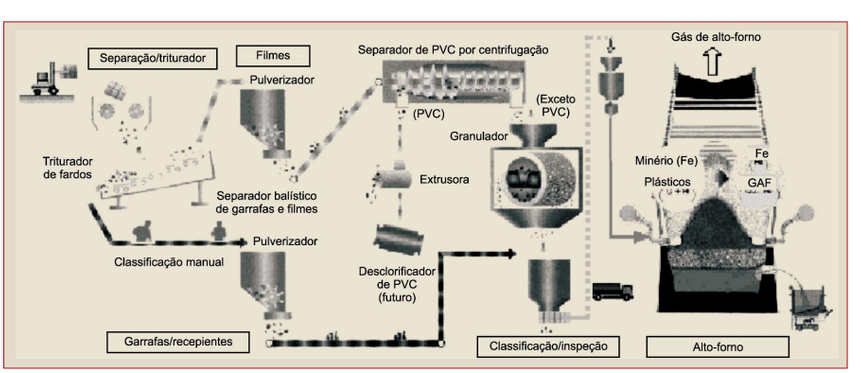

Fig. 5 – Linha para pré-processamento da sucata plástica recebida, tanto na forma de garrafas como de filmes, transformando-a em grânulos na dimensão ideal para introdução no alto-forno[6]

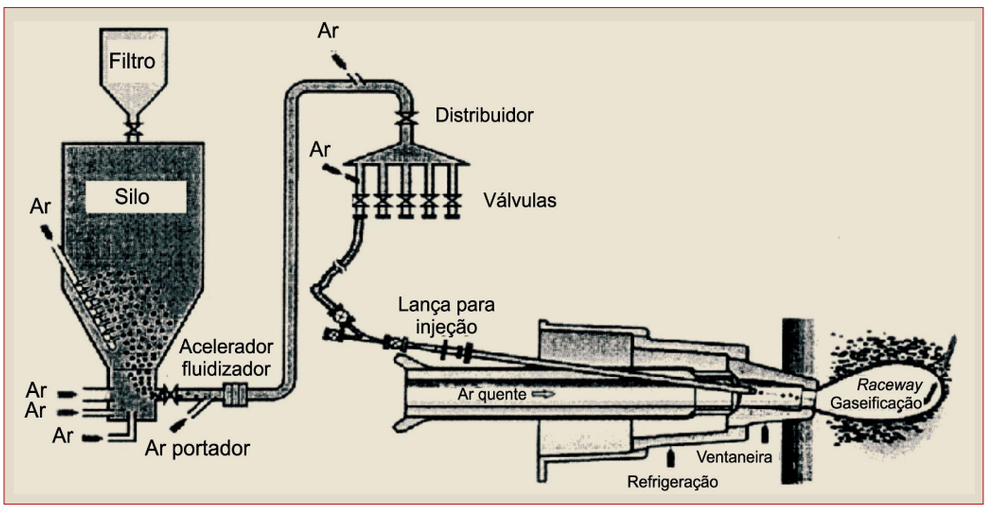

Fig. 6 – Esquema de introdução da mistura de ar mais grânulos de sucata plástica no alto-forno[13]

na resina, o qual é liberado na forma de HCl, que é recuperado e vendido. O resíduo carbonizado é injetado normalmente nos altos-fornos, juntamente com as demais resinas plásticas poliolefínicas[6].

A inserção de PVC em altos-fornos também gerou temores quanto à possível formação e incorporação de dioxinas e furanos ao gás gerado nesse reator. Contudo, os experimentos feitos nas usinas alemãs envolvendo a introdução de sucata de embalagens plásticas no alto-forno sem a exclusão dessa resina não revelaram a presença de dioxinas no gás gerado[7].

O resíduo automotivo leve também pode conter elementos prejudiciais ao processo siderúrgico, tais como zinco (Zn), chumbo (Pb), álcalis e cloro (Cl). Além disso, ele pode ser contaminado pela sucata metálica decorrente da trituração do automóvel, podendo contaminar o gusa (e o aço líqüido produzido a partir dele) com fósforo (P), enxofre (S), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni) e vanádio (V),

elementos que podem ser prejudiciais às características do produto siderúrgico. Infelizmente, as soluções para esse problema não são baratas[4].

A experiência alemã com a inserção de sucata plástica em altos-fornos iniciou-se em 1993, quando foram realizados os primeiros testes em escala piloto na Stahlwerke Bremen. Os resultados da experiência foram animadores o suficiente para que em 1995 a empresa firmasse um acordo com a Duales System Deutschland, a entidade que administra a reciclagem de materiais naquele país, para garantir o fornecimento de 50 mil toneladas por ano de sucata plástica ao longo de 48 meses. Isso foi feito para tornar viável a construção de um sistema com capacidade para consumir 70 mil t/ano de sucata plástica no alto-forno dessa usina. Essa linha tritura ou prensa a sucata plástica transformando-a em grânulos com diâmetro máximo de 5 mm, condição ideal para a sua inserção[7,10]. A tabela 2 mostra as especificações que a sucata plástica pronta para inserção no alto-forno deve atender na Stahlwerke Bremen.

Na siderúrgica japonesa NKK as experiências com a inclusão de plásticos no alto-forno se iniciaram em 1996 e os resultados obtidos também foram animadores[2]. Até 2002 já eram queimados 110 mil toneladas de sucata plástica por ano nos alto-fornos de suas usinas de Keihin e Fukuyama, com exceção do PVC e PET. O PVC não é utilizado devido aos problemas provocados pela liberação de cloro. Já o reaproveitamento do PET na fabricação de chapas ou tecidos é considerado mais racional do que a sua mera queima, mesmo em altos-fornos[6].

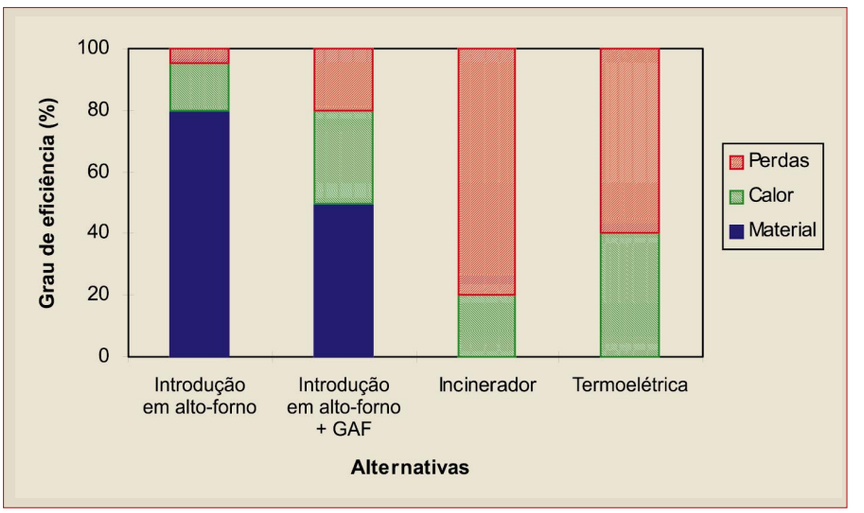

Fig. 7 – Comparação do rendimento em termos de recuperação de energia e material entre as diversas rotas para processamento dos rejeitos de plástico pós-consumo[10]

Aspectos técnicos da inserção de sucata plástica em altos-fornos

A figura 5 mostra o esquema da linha usada para o pré-processamento da sucata plástica, que tem por objetivo transformá-la em grânulos com diâmetro máximo de 5 mm, ideais para serem inseridos na região das ventaneiras dos altos-fornos siderúrgicos. Como se pode observar, essa linha aceita fardos de sucata plástica em geral, processando tanto garrafas como filmes[6].

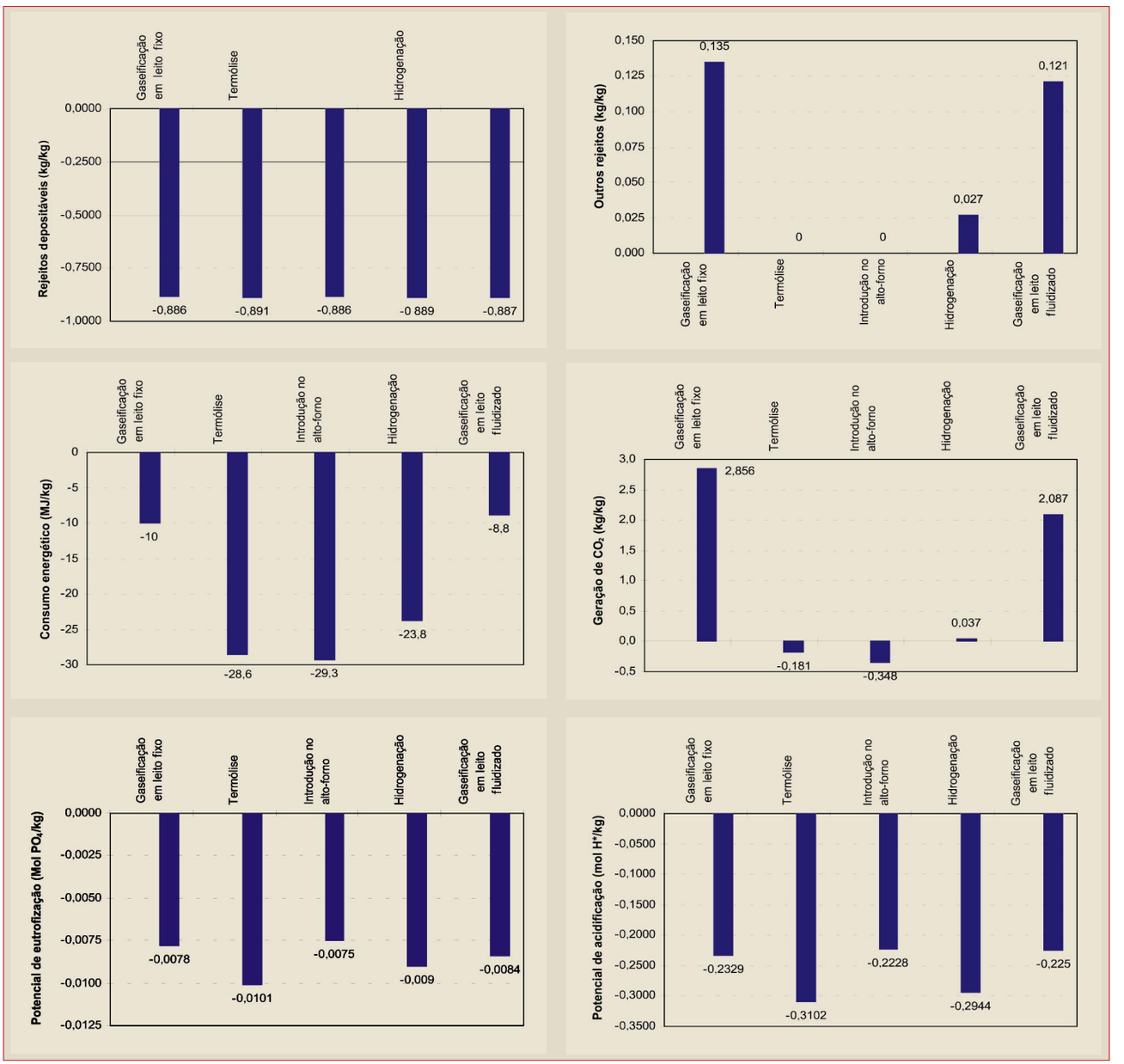

Fig. 8 – Variações observadas nas magnitudes dos diversos tipos de impacto ecológico quando se substitui a mera deposição de lixo plástico no meio ambiente por outras alternativas de tratamento para esse rejeito. São elas: gaseificação em leito fluidizado, gaseificação em leito fixo, hidrogenação, termólise e inserção em altos-fornos. Os dados se encontram expressos em termos da alteração verificada no parâmetro específico a cada quilograma de resina reciclada[10]

Já a figura 6 mostra esquematicamente como é feita a introdução dos grânulos de sucata plástica no alto-forno[13]. Eles são armazenados em um silo, sendo dele retirados na forma de uma mistura fluida com ar que permite o seu transporte pneumático até o alto-forno. A mistura de ar com plástico é introduzida em uma ventaneira do alto-forno com o uso de uma lança. Isso faz com que os grânulos de sucata plástica sejam introduzidos na região mais aquecida desse reator metalúrgico, sob temperaturas acima de 2.000°C[2]. Isso proporciona gaseificação imediata do polímero, cujas macromoléculas se dissociam nos átomos básicos que a constituem: carbono e hidrogênio. Esses elementos então passam a participar das reações metalúrgicas no alto-forno da mesma forma como os gerados a partir da injeção convencional de carvão pulverizado e óleo. Portanto, são justamente as altíssimas temperaturas reinantes na região das ventaneiras do alto-forno que garantem o processamento bem sucedido da sucata plástica.

Uma grande preocupação dos especialistas siderúrgicos era a possibilidade da geração de resíduos carbonizados não-queimados a partir da sucata plástica, os quais podem afetar a permeabilidade da

carga e, dessa forma, perturbar a marcha do alto-forno. Contudo, os estudos feitos na siderúrgica NKK afastaram essa possibilidade, desde que a quantidade de material inserido seja compatível com o diâmetro das partículas e a sua dureza[2]. Outro aspecto que parece ser de fundamental importância é a estrutura da partícula de plástico. Partículas porosas apresentam maior área superficial específica para aquecimento e reações químicas, o que torna sua gaseificação mais rápida e fácil. Já as partículas maciças possuem gaseificação mais difícil, fato que limita o valor máximo de diâmetro que deve ser seguido para manter uma marcha adequada no alto-forno[4]. Esse também é o motivo pelo qual a substituição de coque por sucata plástica na carga enfornada pelo topo do alto-forno não é recomendável, uma vez que ela atravessa regiões do equipamento que se encontram sob temperaturas significativamente menores. Sob tais condições, a dissociação total das cadeias não é possível, ocorrendo então a formação dos resíduos carbonizados não-queimados que podem afetar significativamente o desempenho do alto-forno.

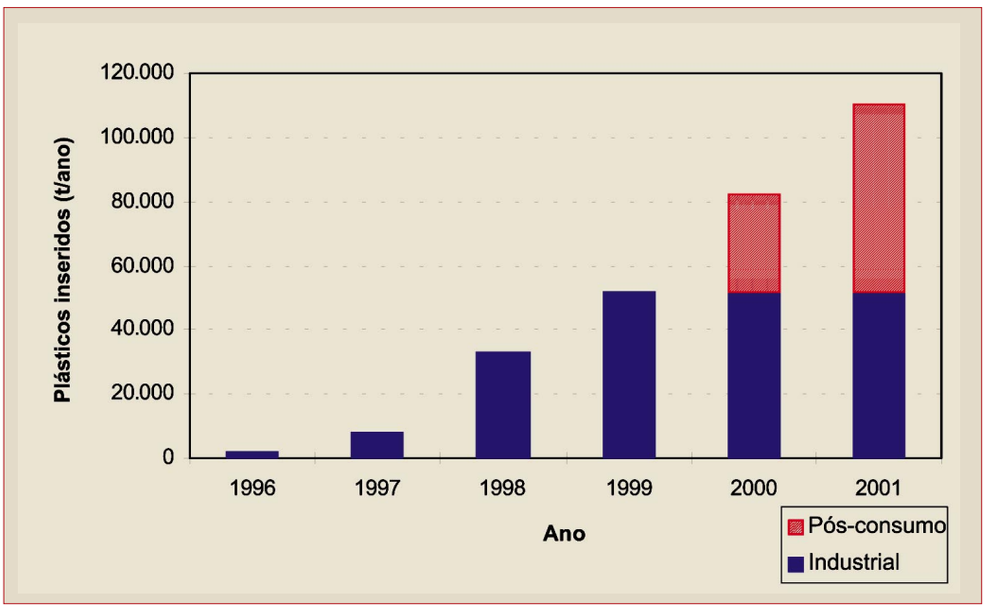

Fig. 9 – Evolução da quantidade anual de sucata plástica introduzida nos altos-fornos da usina siderúrgica NKK[13]

A tabela 3 mostra os valores dos principais parâmetros operacionais dos alto-fornos da siderúrgica japonesa NKK antes e após a prática de introdução de sucata plástica[13]. Como se pode observar, as alterações decorrentes da inserção de plástico nesses parâmetros foram virtualmente nulas, o que confirma a compatibilidade dos polímeros com os materiais usualmente utilizados nesse reator metalúrgico.

A prática da inserção de sucata plástica em altos-fornos revelou alguns inconvenientes insuspeitados. Constatou-se, por exemplo,

que o uso de plásticos reforçados com fibras tendeu a provocar problemas de entupimento no sistema de introdução pneumática de plástico. Além disso, a abrasividade das partículas de plástico foi maior do que a esperada, principalmente no caso dos materiais reforçados com fibras de vidro, fato que ocasionou um inesperado desgaste mais acentuado do equipamento. Este último problema foi resolvido com a seleção de materiais mais resistentes na construção do sistema de introdução[7].

Contudo, essas pequenas desvantagens não empanaram o sucesso dessa nova forma de processamento de rejeitos de material plástico. Como se pode observar na figura 7, esta técnica apresenta maior rendimento energético em relação a outras alternativas de processamento, como a queima desse rejeito em plantas para incineração de lixo ou em usinas termoelétricas. Além disso, seu uso no alto-forno também implica em um certo aproveitamento do material em si, uma vez que parte de seus átomos de carbono é incorporada ao ferro-gusa que será posteriormente transformado em aço[10].

Além disso, uma comparação entre os impactos ecológicos resultantes das diversas alternativas para processa-

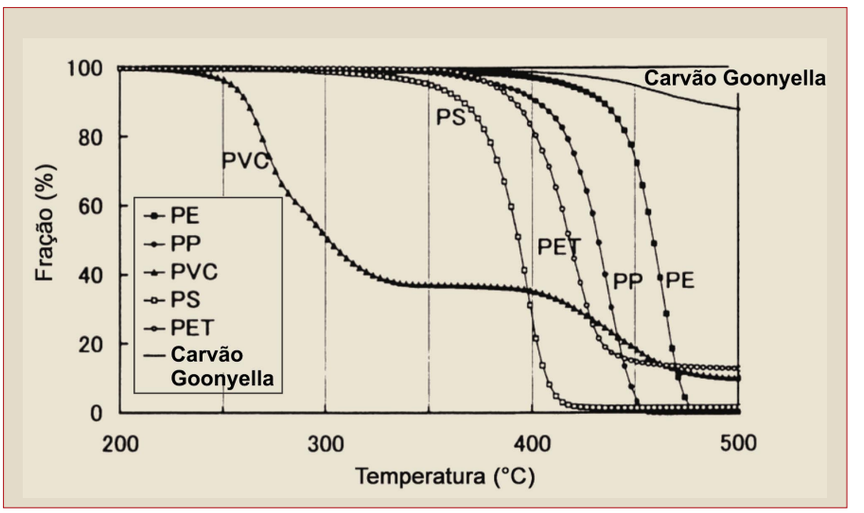

Fig. 10 – Curvas de decomposição térmica para vários tipos de resinas plásticas e para o carvão Goonyella[8]

mento do lixo plástico também revelou outras vantagens associadas à injeção desse material em altos-fornos. De fato, como mostra a figura 8, uma comparação dessa rota com a gaseificação em leito fluidizado, gaseificação em leito fixo, hidrogenação e termólise mostrou que ela é a melhor alternativa para o processamento de rejeitos de plástico em termos de aproveitamento energético, redução da geração de dióxido de carbono (CO_2) e da geração de outros resíduos. Nos demais casos, a inserção de resíduos plásticos no alto-forno pode não ser a alternativa ecologicamente mais eficiente, mas ela sempre reduz a agressão ecológica produzida em relação à que ocorre no caso do mero abandono do lixo plástico no meio ambiente[10].

Tendo em vista esses resultados, não é surpresa constatar que a reciclagem de sucata plástica pela introdução desse material em altos-fornos vem aumentando ano após ano. Conforme mostra a figura 9, a quantidade desse material incluída nos altos-fornos da usina japonesa NKK se elevou de 5 mil t/ano em 1996 para 110 mil t/ano em 2001. Este gráfico também mostra um fato interessante: inicialmente a sucata de plástico utilizada era exclusivamente proveniente de rejeitos de transformadores de plástico, mas, a partir de 2000, iniciou-se o processamento de plástico pós-consumo vindo do sistema público de coleta de lixo. Já em 2001 essa fonte representou a metade de toda a quantidade de plástico introduzidos nos altos-fornos da NKK[13].

Uso de sucata plástica como material coqueificável

A Nippon Steel, outra siderúrgica japonesa, adotou uma abordagem diversa para o reaproveitamento de sucata plástica, usando-a na forma de material coqueificável[5]. Como se sabe, as siderúrgicas produzem o coque necessário para uso em seus altos-fornos processando carvão mineral em coquerias. Essas instalações têm como objetivo extrair todo o material volátil presente nesse insumo, o qual é posteriormente separado em gás combustível (o chamado gás de coqueria) e produtos carboquímicos, tais como o tolueno, xileno e benzeno. O resíduo sólido remanescente – o coque – é carbono em estado puro e é usado nos altos-fornos como um dos reagentes fundamentais para extrair o ferro de seu minério. Esse processo ocorre pelo aquecimento do carvão mineral sob altas temperaturas, promovendo sua destilação na ausência de ar.

Como já foi visto anteriormente, a composição química da sucata plástica é muito similar à do carvão mineral usado pelas siderúrgicas, o que torna esse rejeito um candidato natural ao processo de coqueificação. Isso motivou a Nippon Steel a iniciar suas experiências com o processamento desse material nas coquerias de sua usina de Kimitsu em 2000[9].

O plástico pós-consumo destinado à coqueria é inicialmente limpo e transformado em briquetes com tamanho adequado ao seu enfornamento. A planta atualmente disponível na Nippon Steel possui capacidade para processar 8,5 toneladas de rejeitos plásticos por hora. A composição média da sucata processada nessa planta é composta por 21% de PE, 25% de PS, 16% de PET, 14% de PP, 5% de PVC e 19% de outras resinas. Essa mistura possui a seguinte análise química média: 72,6% de carbono, 9,2% de hidrogênio, 0,3% de nitrogênio e 0,04% de enxofre, mais 5% de cinzas. Os briquetes são enfornados normalmente juntamente com o carvão mineral.

A temperatura do processo de coqueificação é da ordem de 1.100 a 1.200°C, portanto bem menor do que a verificada na região das ventaneiras dos altos-fornos, onde é queimado o plástico pós-consumo inserido. Por esse motivo, os rejeitos plásticos processados em coquerias não sofrem a dissociação molecular completa verificada nos altos-fornos, mas sim uma destilação similar à que o carvão é submetido. A destilação dos rejeitos de plástico gera 40% de óleo, 40% de gás e 20% de coque, enquanto a do carvão mineral gera, respectivamente, 5, 10 e 85%. O óleo gerado é usado na fabricação de alcatrão e gasóleo, uma matéria-prima para plásticos e tintas. O gás serve de combustível para a usina, enquanto o coque será usado no alto-forno.

As diferenças observadas nos produtos de destilação decorrem das diferenças de composição química entre o carvão e os rejeitos plásticos, além da natureza das moléculas envolvidas. As moléculas do carvão são bem mais simples do que as dos polímeros presentes no rejeito plástico. De fato, ensaios de destilação a quente em meio redutor mostram que os plásticos se decompõem sob temperaturas bem menores do que o carvão, conforme mostrado na figura 10 (enquanto polímeros transformam-se em gás na faixa entre 200 e 450°C, no caso do carvão a gaseificação mal está se iniciando sob esta última temperatura). Por sua vez, a figura 11 mostra que plásticos alifáticos tais como o PE, PET e PVC, transformam-se na sua maior parte em gás, enquanto um polímero aromático, como o PS, gera grande quantidade de óleo e maior fração de coque[8].

O uso de rejeito plástico como material coqueificável é justificável desde que ele não afete as características desejadas no coque relativas à qualidade. O principal ponto de preocupação é a resistência mecânica dessa matéria-prima, a qual deve apresentar um nível adequado para suportar as cargas mecânicas que serão impostas a ela durante a sua passagem pelo alto-forno. Os resultados obtidos na Nippon Steel indicaram que a adição de 1% de sucata plástica ao carvão mineral não afetou a resistência mecânica do coque, expressa pelo "*drum index*" (resistência mecânica do coque sob temperatura ambiente) e a resistência mecânica do coque logo após a reação de coqueificação. Constatou-se ainda que adições superiores a 2% não são aconselháveis, pois acarretam uma

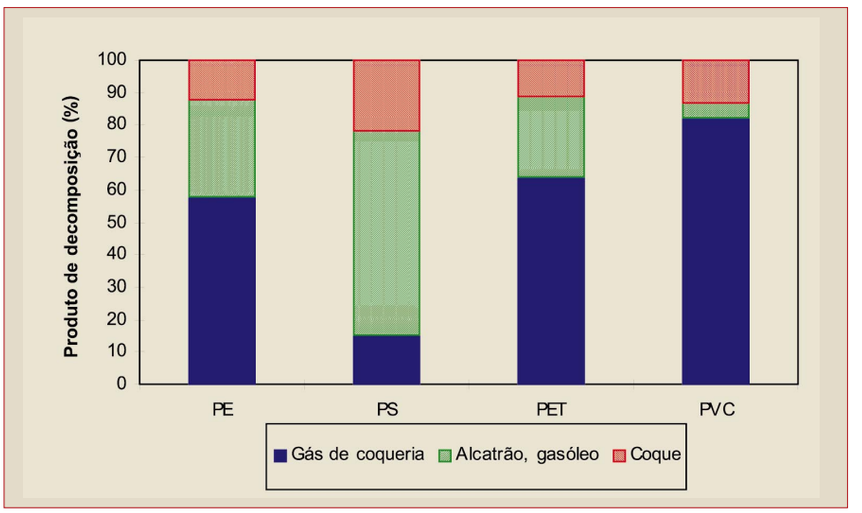

Fig. 11 – Taxa de conversão das resinas plásticas mais comuns em gás, óleo e coque[8]

queda significativa da resistência mecânica do coque, o que produz uma perturbação inaceitável na marcha dos altos-fornos[9].

Apesar dessa baixa capacidade de absorção, as coquerias japonesas teriam condições de consumir 500 mil t/ano de sucata plástica, já que processam cerca de 50 Mt de carvão anualmente. Isto representa algo em torno de 5% do lixo plástico gerado naquele país. Os bons resultados obtidos na Nippon Steel motivaram a implantação industrial desse método de processamento de sucata plástica a partir do ano 2000. Em 2004 a Nippon Steel já podia processar até 120 mil t/ano de sucata plástica em suas coquerias distribuídas nas usinas de Kimitsu, Nagoya, Muroran e Yawata[9].

Conclusões

Como se pode observar, o processamento de sucata plástica pela sua inserção em altos-fornos siderúrgicos mostrou-se ser técnica e economicamente viável no Japão e na Alemanha, passando a contribuir significativamente para a solução do grave problema do lixo plástico. Outros países, como os Estados Unidos, também vêm estudando esse processo com resultados animadores.

Contudo, em ambos os casos, o fator decisivo para o sucesso desta abordagem foi a promulgação de legislação obrigando aos fabricantes e transformadores de material plástico a reprocessarem seus produtos após o fim de sua vida útil. Tal imposição representou um formidável impacto para a indústria de embalagens, artigos com vida útil extremamente reduzida.

As experiências alemã e japonesa nesse campo permitem afirmar que o uso de sucata plástica na forma de combustível em fornos industriais, siderúrgicos ou não, somente será viabilizada no Brasil se houver a promulgação e o efetivo cumprimento de uma legislação que proíba sua mera deposição em lixões e obrigue ao seu reprocessamento. Somente dessa forma é que surgirá a motivação para criar uma estrutura logística que permita a coleta e a classificação dos resíduos plásticos, gerando uma oferta estável desse insumo para o seu pro-

cessamento racional.

Do ponto de vista meramente econômico, a introdução de sucata plástica em altos-fornos é inviável no Brasil. De fato, enquanto o preço do carvão pulverizado é da ordem de R$ 190 por tonelada, a sucata plástica mais barata (polietileno) apresenta custos da ordem de R$ 400 por tonelada (dados de 2004). Mas a grande vantagem dessa alternativa de reprocessamento está no fato de que ele aceita até mesmo rejeitos plásticos inadequados para reaproveitamento como matéria-prima na indústria de transformação, cujo preço é função tão somente dos custos associados à sua coleta, transporte e preparação. Ainda assim há todo um trabalho de convencimento técnico a ser efetuado junto à indústria siderúrgica. E, uma vez acertado esse ponto, é necessário desenvolver um trabalho de engenharia econômica e política que viabilize a logística necessária para garantir um fornecimento estável de rejeitos plásticos para as indústrias que se dispuserem a processar esse material em seus fornos. Obviamente, esta engenharia terá de incluir incentivos e compensações, inclusive financeiros, para as indústrias que se dispuserem a processar esses resíduos.

As resinas plásticas são materiais altamente competitivos e aceitos com entusiasmo pelos consumidores devido às suas extraordinárias propriedades. Contudo, o problema de seu destino pós-consumo vem crescendo ao longo das décadas e, cedo ou tarde, terá de ser encarado com seriedade para ser adequadamente resolvido. Isso só será conseguido de forma eficaz e permanente com um esforço cooperativo entre os vários níveis de governo, produtores e transformadores de resina, consumidores e as indústrias que se disponham a processá-lo, de modo a encontrar uma solução em que todos saiam ganhando.

REFERÊNCIAS

1) ABIPLAST. *Perfil da Indústria Brasileira de Transformação de Material Plástico – 2002*. Publicação da Associação Brasileira da Indústria do Plástico, 2003.
2) ASANUMA, M. *et al*. Development of waste plastics injection process in blast furnace. In: *ISIJ International*, mar. 2000, p. 244-251.
3) ASHBY, M. *Material selection charts*. http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts. Acesso em 24 de outubro de 2003.
4) BUCHWALDER, J. *et al.* Anforderungen an Reststoffe für das Einblasen in den Hochofen. *Stahl und Eisen*, jan. 2003, p. 29-38.
5) GOTO, H. *et al.* Plastics recycling by a coke-oven from waste plastics to chemical raw materials. *Nippon Steel Technical Report*, jul. 2002, p. 10-13.
6) HOTTA, H. Recycling technologies for promoting recycling-oriented society. *NKK Technical Review*, 88, 2003, p. 160-166.
7) JANZ, J.; WEISS, W. Injection of waste plastics into the blast furnace of Stahlwerke Bremen. *La Revue de Metallurgie – CIT*, out. 1996, p. 1219-1226.
8) KATO, K. *et al.* Development of waste plastics recycling process using coke ovens. In: *ISIJ International (Supplement)*, 2002, p. S10-S13.
9) KATO, K. *et al*. Development of waste plastics recycling process using coke ovens. *Nippon Steel Technical Report*, jan. 2003, p. 67-69.
10) LINDENBERG, H. U. *et al*. Rohstoffliches Recycling von Kunststoffen als Reduktionsmittel im Hochofen. *Stahl und Eisen*, ago. 1996, p. 89-93.
11) OGAKI, Y. *et al*. Recycling of waste plastic packaging in a blast furnace system. *NKK Technical Review*, 84, 2001, p. 1-7.
12) RUMPEL, S. *Die autotherme Wirbelschichtpyrolyse zur Erzeugung heizwertreicher Stützbrenns-toff.* Wissenschaftliche Berichte FZKA 6490, Forschungzentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, fev. 2000. 178 p.
13) WAKITA, S. *et al*. Recycling of waste plastics in NKK. *SEAISI Quarterly*, dez. 2002, p. 60-67.