

# APROVEITAMENTO DE PLÁSTICO PÓS-CONSUMO NA FORMA DE COMBUSTÍVEL PARA ALTOS-FORNOS E COQUERIAS<sup>1</sup>

Antonio Augusto Gorni<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Publicado na Revista Plástico Industrial, Janeiro 2006, pág. 84-100.

<sup>2</sup> Engenheiro de Materiais, M. Eng., Dr. Eng.; Analista de Processos da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP; Editor Técnico da Revista Plástico Industrial, Aranda Editora, São Paulo SP; Professor da UniFEI - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo SP. Endereço eletrônico: agorni@iron.com.br

## RESUMO

O acelerado consumo e descarte de plásticos usados em aplicações efêmeras, tais como embalagens, está levando a um alarmante acúmulo nos depósitos de lixo de materiais que podem levar centenas de anos para se decompor. O processamento desse rejeito na forma de combustível em altos-fornos ou coqueiras é uma contribuição que vem se revelando cada vez mais importante para a solução desse problema. Essa alternativa viabiliza o uso sustentado do plástico como material, permitindo ainda que se reduza o custo operacional das siderúrgicas ao mesmo tempo em que elas cumprem mais um papel social, contribuindo com a comunidade para se resolver um problema que vem se tornando cada vez mais grave ao meio ambiente. Este trabalho tem como objetivo fazer uma revisão sobre a utilização desse novo procedimento em siderúrgicas no exterior, apontando suas vantagens e as condições que tiveram de ser satisfeitas para que ele fosse bem sucedido.

**Palavras-Chave:** Alto Forno, Coqueira, Injeção de Plásticos

## - INTRODUÇÃO

O consumo de plásticos no Brasil e no mundo vem aumentando há décadas, numa clara demonstração do enorme sucesso conseguido por esse material nas mais variadas aplicações, conforme mostrado na figura 1 [ABIPLAST 2003]. As características típicas dos plásticos, como seu custo praticamente irrisório, baixo peso, boa resistência mecânica, impermeabilidade, transparência e capacidade de coloração mais impressão lhe conferiram trunfos irresistíveis para seu uso massivo na forma de embalagens, uma aplicação extremamente importante numa sociedade voltada para o consumo. Portanto, nada mais natural que esses materiais tenham avançado irresistivelmente sobre esse mercado: do total de 3,97 Mt toneladas de plásticos consumidos no Brasil em 2002, nada menos do que 1,58 Mt foram usados na forma de embalagens e 0,46 Mt como produtos descartáveis. Ou seja, só nesse 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 Brasil 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.

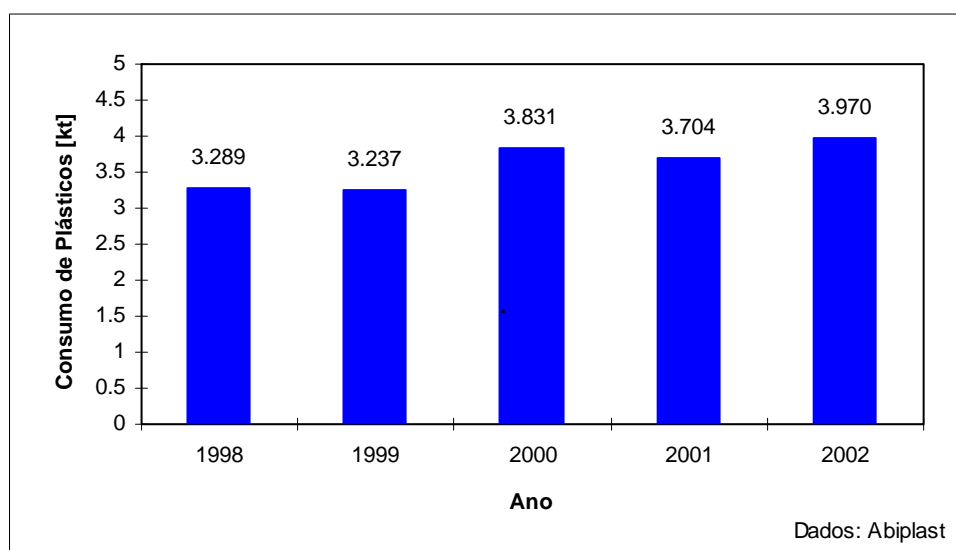


Figura 1: Consumo total de plásticos no Brasil ao longo dos últimos anos [ABIPLAST 2003].

Esses dados são espantosos, mas a situação é ainda mais surpreendente nos países 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 em 1999 através de 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 [ASANUMA 2000].

Não é novidade nenhuma que essa enorme geração de rejeitos, uma consequência 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 [ASHBY 2003] 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 de qualidade típicas do material virgem. O PE é a resina mais recicla-

da, sendo seguida pelo PS e PP. A seguir, aglomeram-se numa posição intermediária diversas resinas, tais como PET, PC, PA, PVC, PMMA e ABS. Por outro lado, como mostra esse mesmo diagrama, resinas termofixas e borrachas praticamente não são reciclados. Como se sabe, esses materiais decompõem-se antes de se fundir, em função de sua estrutura de ligações covalentes cruzadas. Este fato dificulta enormemente seus processos de reciclagem. 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 seu alto grau de reciclagem, algo que já ocorre há décadas na siderurgia e que mais recentemente tornou-se um retumbante fato na indústria do alumínio.

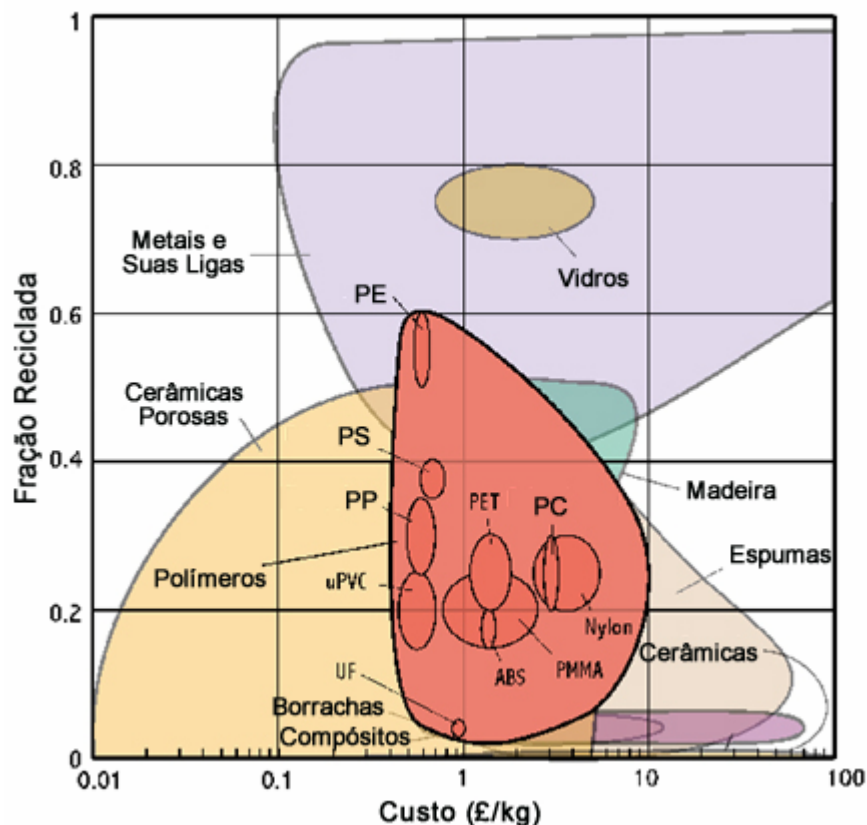


Figura 2: Diagrama de Ashby que mostra a relação entre os preços dos diversos materiais de engenharia e suas frações recicladas [ASHBY 2003].

Portanto, se se deseja manter o plástico como material viável num futuro próximo, é necessário encontrar alternativas para uma recuperação racional dos descartes desse tipo de material, particularmente do tipo 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 minimização do impacto ambiental [RUMPEL 2000]:

- 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 seu baixo valor agregado, alto volume e qualidade geralmente inaceitável do material reciclado a partir dela. 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 recuperador pode ser inviável. Note-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...

Os exemplos bem-sucedidos já disponíveis sobre a reciclagem de rejeitos plásticos pós-consumo mostram uma série de características próprias que garantiram 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 [JANZ 1996, LINDENBERG 1996, HOTTA 2003]. Simultaneamente foram tomadas diversas outras medidas para viabilizar a reciclagem dos plásticos e minimizar 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 sua deposição em locais adequados, evitando sua mistura e contaminação. A mera deposição de plástico em lixões foi proibida. Foi criada toda uma estrutura para a classificação e embalagem 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 extremamente baixo da resina virgem a qual, além disso, geralmente apresenta melhores propriedades.

Outra frente desta batalha está na recuperação de bens duráveis sucataados. Um caso emblemático é o dos automóveis. A legislação europeia impõe que em 2006 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 sucataado, 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 500.000 t desse resíduo e estima-se que em 2015 essa quantidade suba para 850.000 t. Lamentavelmente esse resíduo também não se presta para ser aproveitado novamente como material [BUCHWALDER 2003]. Uma abordagem similar também está sendo proposta no Japão para os aparelhos eletrodomésticos [HOTTA 2003].

Logo, sobram como alternativas para a reciclagem desse material o seu reprocessamento químico ou 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.

Uma análise do material plástico reciclado na Alemanha em 1996 mostrou que apenas uma pequena fração dos rejeitos apresentava pureza suficiente para ser reaproveitada através da recuperação exclusiva de material. 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, através de processamento em alto-forno, termólise, hidrogenação e gaseificação em leito fixo ou fluidizado. Os restantes 3% se

mostraram impuros demais para essas abordagens, restando apenas sua reciclagem energética através de incineração [LINDENBERG 1996].

### - 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-se 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 combinar-se 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 deposita-se no estado líquido 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 líquida que sobrenada o banho de metal líquido, 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.

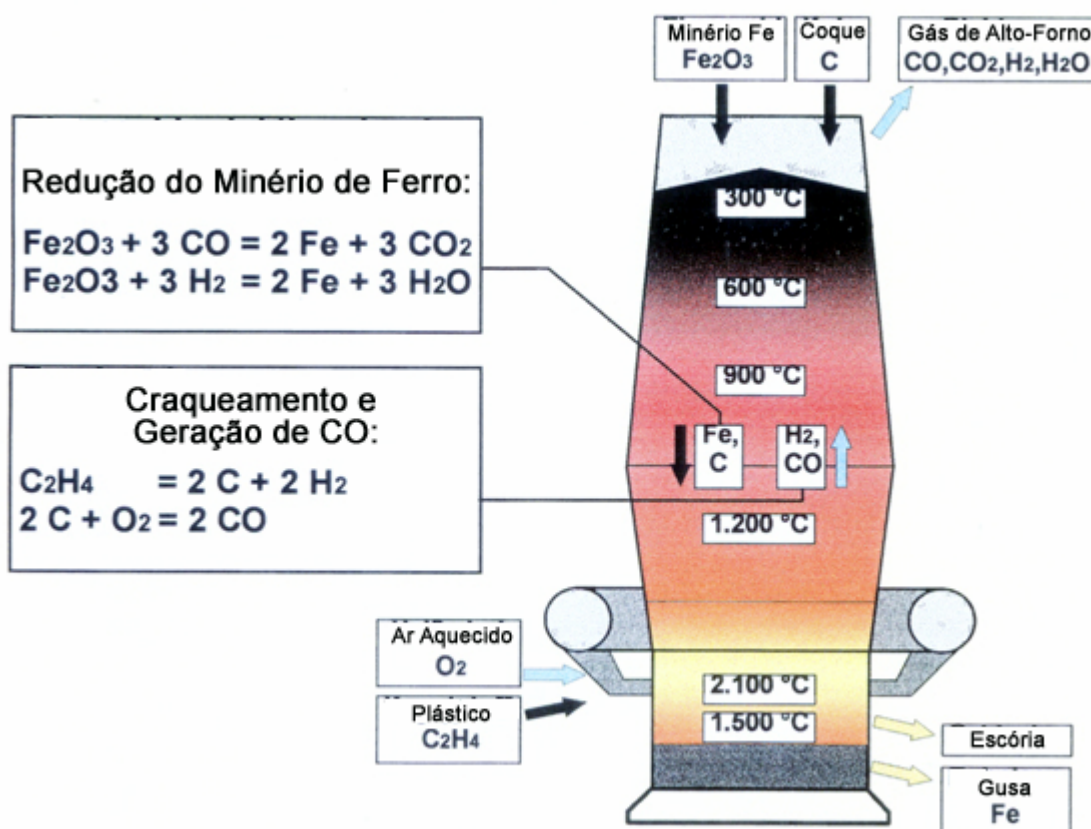


Figura 3: Reações químicas fundamentais num alto-forno siderúrgico [LINDENBERG 1996].

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 I [JANZ 1996, LINDENBERG 1996]. Logo, em tese, também a sucata plástica pode ser injetada em altos-fornos no lugar do carvão pulverizado ou 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 coquearias.

%	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

Tabela I: Comparação entre as análises químicas de carvão pulverizado, óleo e sucata plástica [LINDENBERG 1996].

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 Alemanha isso foi conseguido através de vários incentivos às siderúrgicas que se dispuseram a processar a sucata plástica:

- Concessão de créditos ambientais;
- Pagamento pelo serviço;
- Melhoria da imagem pública.

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 transporte dos resíduos plásticos desde os pontos de sua geração até as usinas siderúrgicas, minimizando também os seus custos.

Do ponto de vista técnico há diversos aspectos que devem ser considerados ao se injetar 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 nos teores de carbono e hidrogênio desse material alteram 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 no fornecimento de outros tipos de combustíveis ao reator. Uma possível forma de se reduzir essa variação pode ser o consumo de aparas e rejeitos plásticos provenientes de empresas que processam esse material, onde 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 [WAKITA 2002].

Outro problema bastante sério é a presença de PVC na sucata plástica. Essa resina contém cloro, o qual é liberado durante sua queima e agregado na forma de HCl ao gás que o alto-forno gera em sua operação. Esse gás é posteriormente usado na própria usina siderúrgica como combustível. Essa contaminação por gás clorídrico torna o gás mais corrosivo, provocando ataque às tubulações e queimadores. Na Alemanha optou-se por se trocar os equipamentos que entram em contato direto com o gás de alto-forno, tornando-os mais resistentes à corrosão por HCl [JANZ 1996]. Já as usinas japonesas decidiram banir o uso de PVC nos altos-fornos, sendo essa resina separada dos rejeitos plásticos através de flotação. Estão sendo desenvolvidos estudos específicos para se definir como será o pré-tratamento dessa resina antes de sua injeção 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 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 [HOTTA 2003].

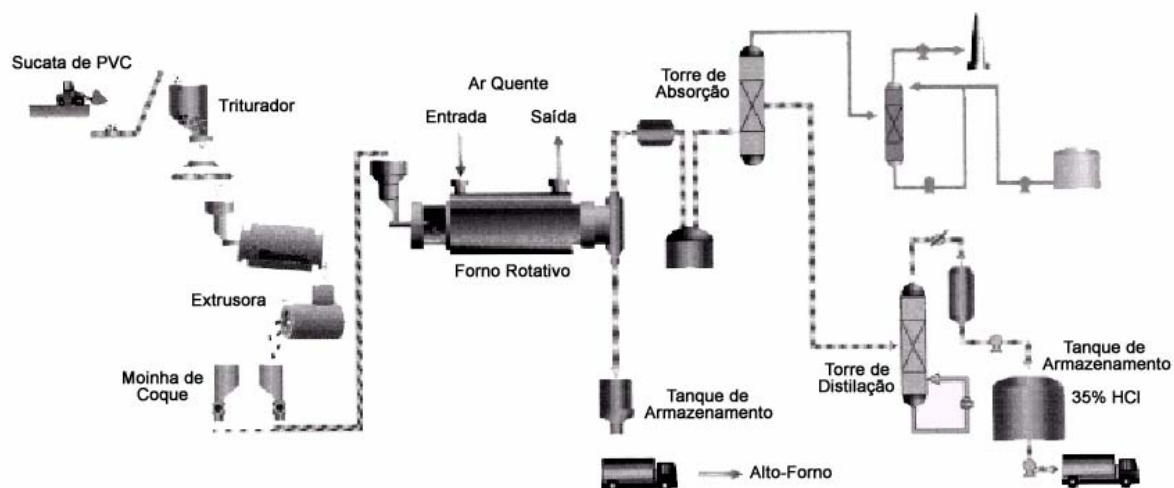


Figura 4: Equipamento usado para extração de cloro da sucata de PVC, permitindo seu uso seguro como material para injeção em altos-fornos. O cloro é recuperado na forma de ácido clorídrico [HOTTA 2003].

A injeção 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 injeção no alto-forno de sucata de embalagens plásticas sem a exclusão dessa resina não revelaram a presença de dioxinas no gás de alto forno gerado [JANZ 1996].

O resíduo automotivo leve também pode conter elementos prejudiciais ao processo siderúrgico, tais como Zn, Pb, álcalis e Cl. Além disso, ele pode ser contaminado pela sucata metálica decorrente da trituração do automóvel, podendo contaminar o gusa (e o aço líquido produzido a partir dele) com P, S, Cu, Cr, Ni e V, elementos que podem ser prejudiciais para as

características do produto siderúrgico produzido. Infelizmente as soluções para esse problema não são baratas [BUCHWALDER 2003].

A experiência alemã com a injeção 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 na Alemanha, para garantir o fornecimento de 50.000 t anuais de sucata plástica ao longo de quatro anos. Isso foi feito para viabilizar a construção de um sistema com capacidade para injetar 70.000 t anuais 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 sua injeção [JANZ 1996, LINDENBERG 1996]. A tabela II mostra as especificações que a sucata plástica pronta para injeção no alto-forno deve atender na Stahlwerke Bremen.

Na siderúrgica japonesa NKK as experiências com a injeção de plásticos no alto-forno se iniciaram em 1996; os resultados obtidos também foram animadores [ASANUMA 2001]. Em 2002 já eram injetados 110.000 t de sucata plástica por ano nos altos-fornos de suas usinas de Keihin e Fukuyama, com exceção do PVC e PET. O PVC não é injetado em função dos problemas provocados pela liberação de cloro. Já o reaproveitamento do PET como resina plástica para a fabricação de chapas ou tecidos é considerado mais racional do que sua mera queima, mesmo em altos-fornos [HOTTA 2003].

Parâmetro		Valor Recomendado
Tamanho de Partícula [mm]		< 10
Fração de Finos Menor que 250 µm [%]		< 1
Densidade Global [t/m <sup>3</sup> ]		> 0,3
Características de Fluxo Pneumático		Boas
	Umidade Residual	< 1
	Cloro	< 2
	Cinzas	< 4,5
Composição Química [%]	Metais	< 3
	Plástico Total	> 90
	Poliiolefinas Totais	> 70
	Plásticos de Engenharia	< 4

Tabela II: Especificações técnicas recomendadas para a sucata de plástico pós-consumo a ser injetada nos altos-fornos da Stahlwerke Bremen [LINDENBERG 1996].

## - ASPECTOS TÉCNICOS DA INJEÇÃO 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 injetados 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 [HOTTA 2003].

Já a figura 6 mostra esquematicamente como é feita a injeção dos grânulos de sucata plástica ao alto-forno [WAKITA 2002]. Eles são armazenados num silo, sendo dele retirados na forma de uma mistura fluida com ar que permite seu transporte pneumático até o alto-forno. A mistura de ar mais plástico é introduzida numa ventaneira do alto-forno usando-se uma lança. Isso faz com que os grânulos de sucata plástica sejam introduzidos na região mais aquecida desse reator metalúrgico, sob temperaturas acima de 2000°C [ASANUMA 2001]. Isso propor-

ciona 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.

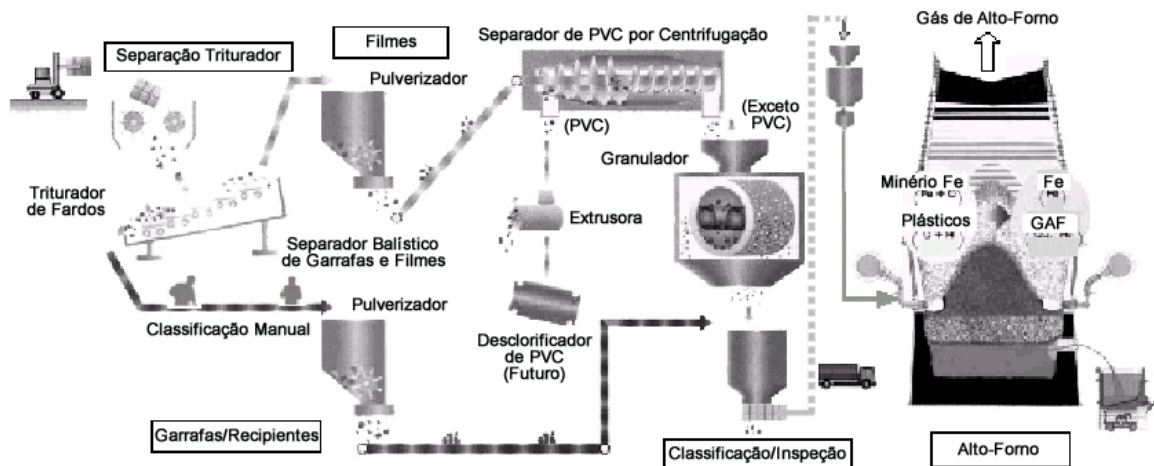


Figura 5 Linha para pré-processamento da sucata plástica recebida, tanto na forma de garrafas como de filmes, transformando-a em grânulos na dimensão ideal para injeção no alto-forno [HOTTA 2003].

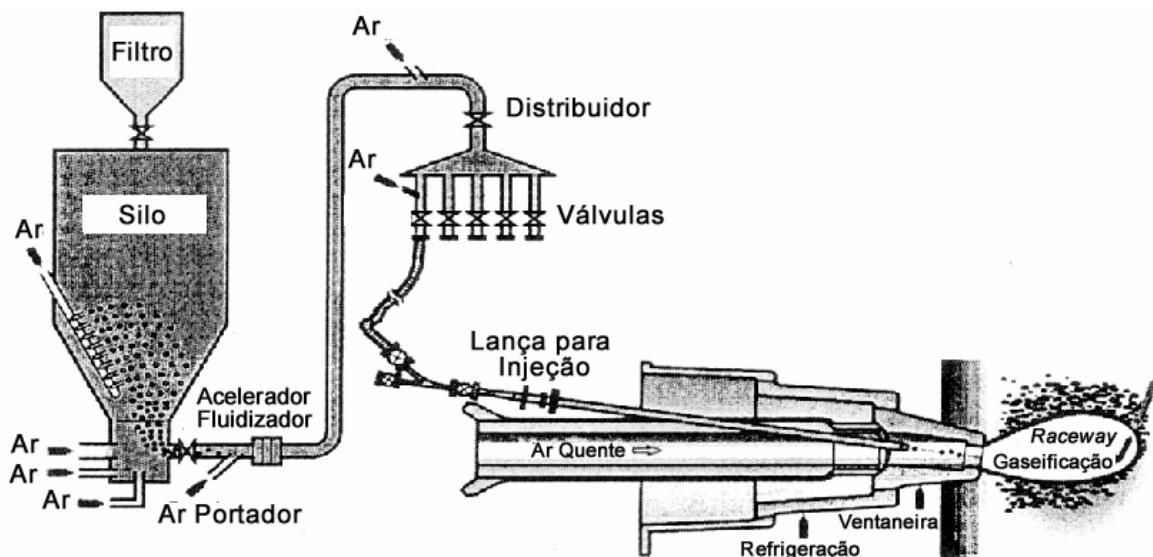


Figura 6: Esquema de injeção da mistura de ar mais grânulos de sucata plástica no alto-forno [WAKITA 2002].

Uma grande preocupação dos especialistas siderúrgicos era a possibilidade da geração de resíduos carbonizados não-queimados a partir da sucata plástica injetada, 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 injetado seja compatível com o diâmetro das partículas e sua dureza [ASANUMA 2000]. Outro aspecto que parece ser de fundamental importância é a estrutura da partícula de plástico. Partículas porosas apresentam maior área superficial específica para aqueci-

mento e reações químicas, o que torna sua gaseificação mais rápida e fácil. Já partículas maciças possuem gaseificação mais difícil, fato que limita o valor máximo de diâmetro que deve ser seguido para se manter uma marcha adequada no alto-forno [BUCHWALDER 2003]. Essa também é a razão pela qual a substituição de coque por sucata plástica na carga enfiada pelo topo do alto-forno não é recomendável, uma vez que ela atravessa regiões do equipamento que se encontram a 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.

A tabela III mostra os valores dos principais parâmetros operacionais dos altos-fornos da siderúrgica japonesa NKK antes e após o uso da injeção de sucata plástica [WAKITA 2002]. Como se pode observar, as alterações decorrentes da injeção de plástico nesses parâmetros foram virtualmente nulas, o que confirma a compatibilidade dos polímeros com os materiais usualmente injetados nesse reator metalúrgico.

<b>Parâmetros</b>	<b>Condição Normal</b>	<b>Com Injeção de Plástico</b>
Vazão de Injeção [kg/t]	-	3
PCI [kg/t]	72	73
Coke Rate [kg/t]	473	468
Fuel Rate [kg/t]	545	544
Produção de Gusa [t/d]	10.600	10.638
Temperatura do Gusa [°C]	1520	1518
CO no Gás de Topo [%]	26,3	26,5
CO <sub>2</sub> [%]	21,5	21,3
H <sub>2</sub> [%]	3,4	3,7
Volume de Gás de Topo [Nm <sup>3</sup> ]	1758	1778
Valor Calorífico GAF [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	3732	3757

Tabela III: Principais parâmetros operacionais dos altos-fornos da usina siderúrgica japonesa NKK antes e depois da implantação da injeção de sucata plástica [WAKITA 2002].

A prática da injeção 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 injeção pneumática de plástico. Além disso, a abrasividade das partículas de plástico foi maior 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 injeção [JANZ 1996].

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, a injeção de sucata plástica em altos-fornos 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 termelétricas. Além disso, seu uso no alto-forno também implica num 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 [LINDENBERG 1996].

Além disso, uma comparação entre os impactos ecológicos resultantes das diversas alternativas para processamento 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, minimização da geração de CO<sub>2</sub> e da geração de outros resíduos. Nos demais casos a injeção de resíduos plásticos no alto-forno pode não ser a alter-

nativa ecologicamente mais eficiente, mas ela sempre minimiza a agressão ecológica produzida em relação à que ocorre no caso do mero abandono do lixo plástico no meio ambiente [LINDENBERG 1996].

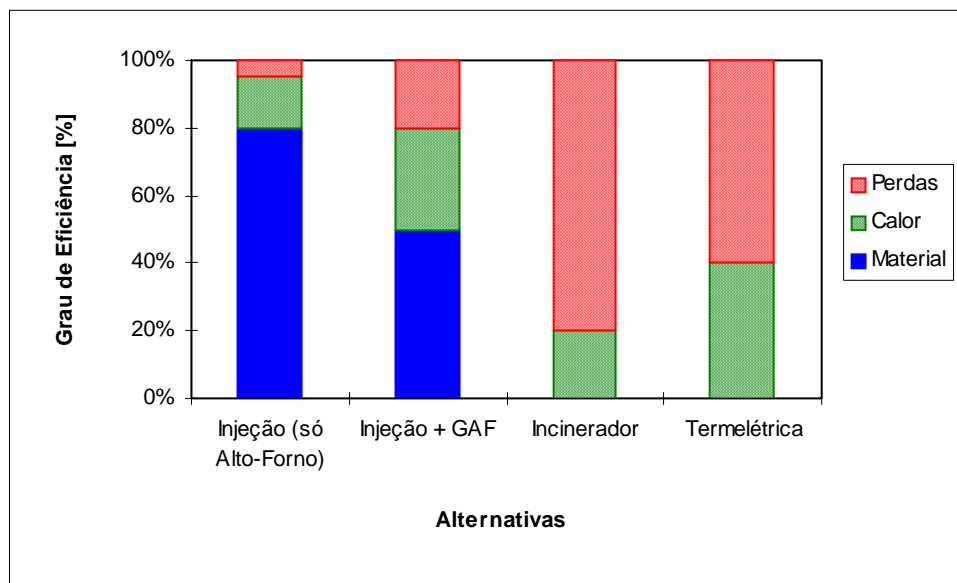


Figura 7: Comparação do rendimento em termos de recuperação de energia e material entre as diversas rotas para processamento dos rejeitos de plástico pós-consumo [LINDENBERG 1996].

Tendo em vista esses resultados não é surpresa constatar que a reciclagem de sucata plástica através da injeção desse material em altos-fornos vem aumentando ano após ano. Conforme mostra a figura 9, a quantidade injetada desse material nos altos-fornos da usina japonesa NKK elevou-se de 5.000 t/ano em 1996 para 110.000 t/ano em 2001. Este gráfico também mostra um fato interessante: inicialmente a sucata de plástico injetada 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 injetado nos altos-fornos da NKK. [WAKITA 2002].

#### - 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 [GOTO 2002]. Como se sabe, as siderúrgicas produzem o coque necessário para uso em seus altos-fornos processando carvão mineral em coquearias. Essas instalações tem 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 se extrair o ferro de seu minério. Esse processo ocorre através do aquecimento do carvão mineral a altas temperaturas, promovendo sua destilação na ausência de ar.

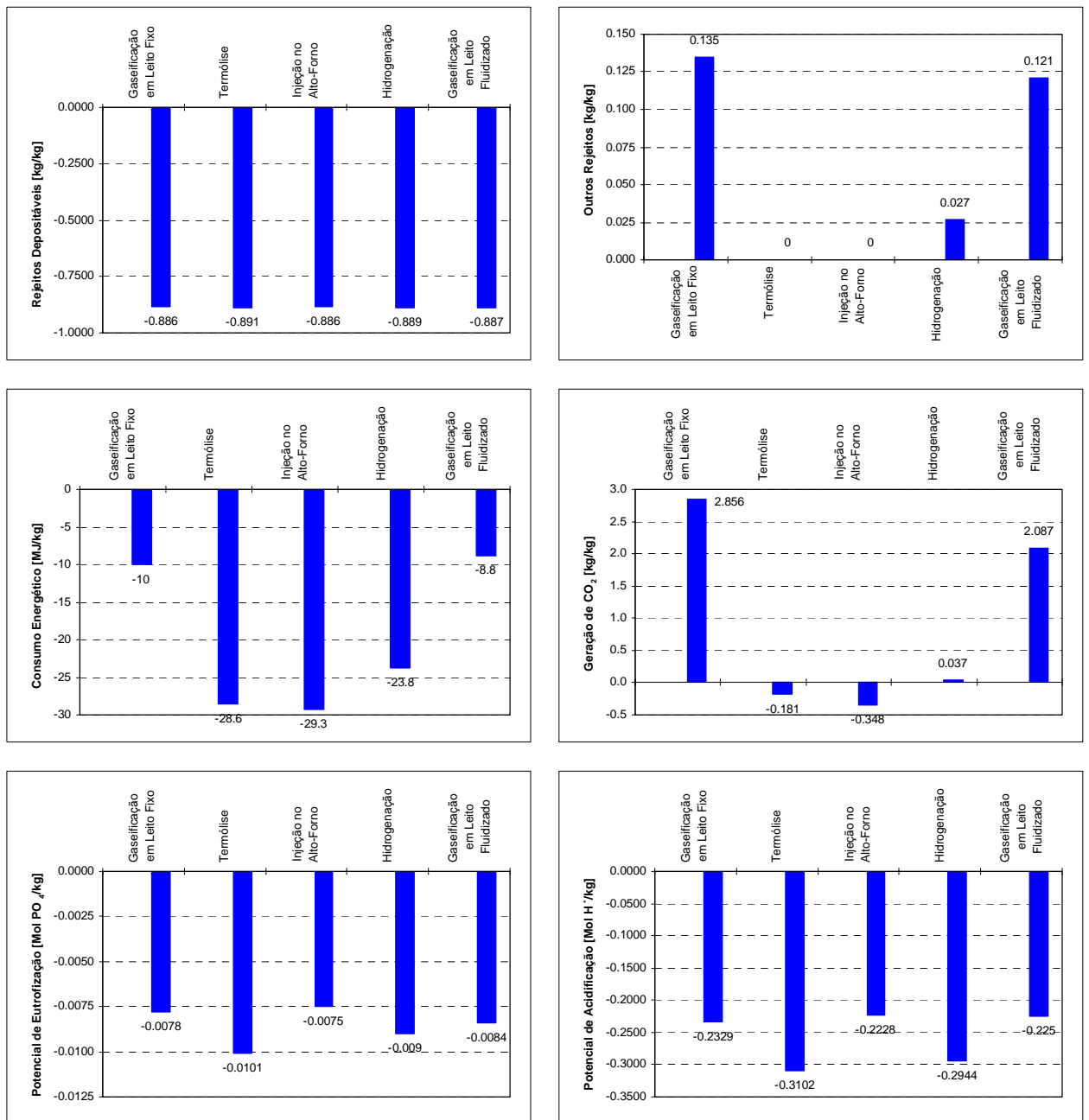


Figura 8: Variações observadas nas magnitudes dos diversos tipos de impacto ecológico quando se substitui a mera deposição de lixo plástico no meio ambiente por outras alternativas de tratamento para esse rejeito. São elas: gaseificação em leito fluidizado, gaseificação em leito fixo, hidrogenação, termólise e injeção em altos-fornos. Os dados se encontram expressos em termos da alteração verificada no parâmetro específico a cada quilograma de resina reciclada [LINDENBERG 1996].

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 coquearias de sua usina de Kimitsu em 2000 [KATO 2003].

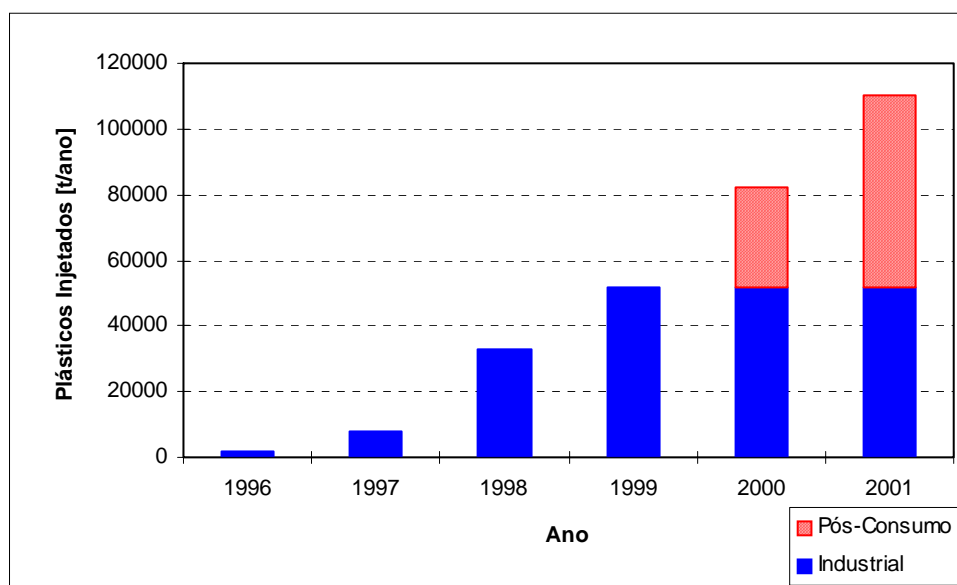


Figura 9: Evolução da quantidade anual de sucata plástica injetada nos altos-fornos da usina siderúrgica NKK [WAKITA 2002].

O plástico pós-consumo destinado à coqueria é inicialmente limpo e transformado em briquetes com tamanho adequado ao seu enforamento. 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 de 21% PE, 25% PS, 16% PET, 14% PP, 5% PVC e 19% de outras resinas. Essa mistura possui a seguinte análise química média: 72,6% C, 9,2% H, 0,3% N e 0,04% S, mais 5% de cinzas. Os briquetes são enforados normalmente juntamente com o carvão mineral.

A temperatura do processo de coqueificação é da ordem de 1100 a 1200°C, portanto bem menor do que a verificada na região das ventaneiras dos altos-fornos, onde é queimado o plástico pós-consumo injetado. Por esse motivo os rejeitos plásticos processados em coquearias 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 que 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 que o coque será usado pelo 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. No carvão as moléculas 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 decompõem-se sob temperaturas bem menores do que o carvão, conforme mostrado na figura 10: enquanto que 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 que um polímero aromático como o PS gera grande quantidade de óleo e maior fração de coque [KATO 2002].

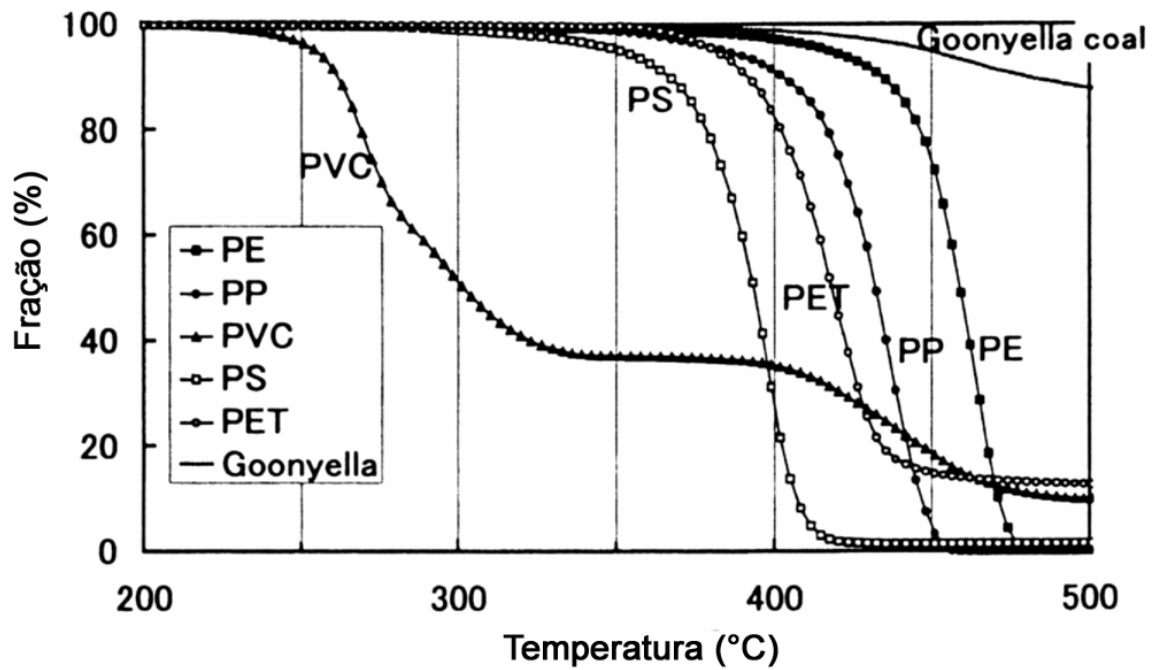


Figura 10: Curvas de decomposição térmica para vários tipos de resinas plásticas e para o carvão Goonyella [KATO 2002].

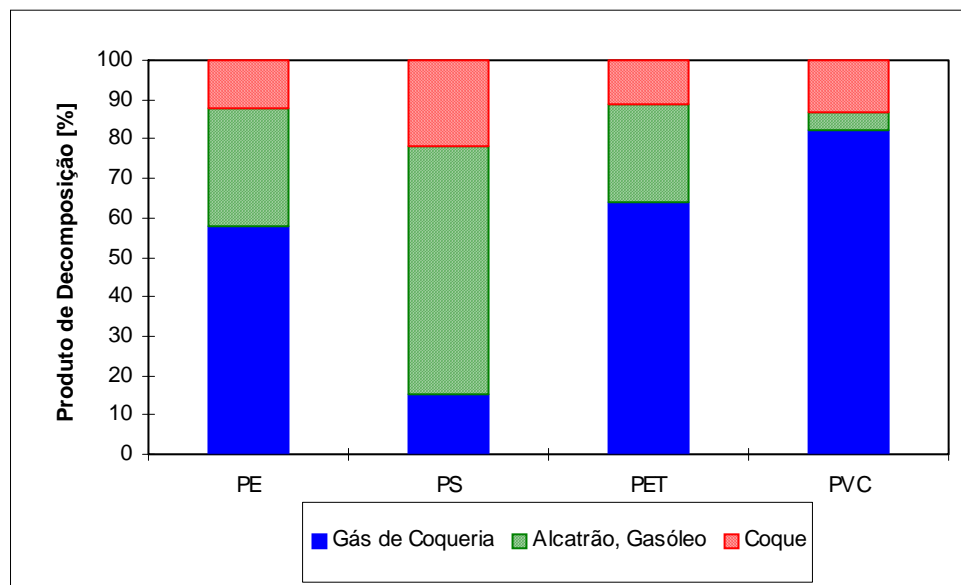


Figura 11: Taxa de conversão das resinas plásticas mais comuns em gás, óleo e coque [KATO 2002].

O uso de rejeito plástico como material coqueificável é justificável desde que ele não afete as características de qualidade desejadas no coque. 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 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 queda significativa na resistência mecânica do coque, o que produz uma perturbação inaceitável na marcha dos altos-fornos [KATO 2003].

Apesar dessa baixa capacidade de absorção, as coquerias japonesas teriam condições de consumir 500.000 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 processo de processamento de sucata plástica a partir do ano 2000. Hoje a Nippon Steel pode processar até 120.000 t/ano de sucata plástica em suas coquerias distribuídas nas usinas de Kimitsu, Nagoya, Muroran e Yawata [KATO 2003].

## **- CONCLUSÕES**

Como se pode observar, o processamento de sucata plástica através da sua injeção em altos-fornos siderúrgicos mostrou-se ser plenamente viável técnica e economicamente no Japão e Alemanha, passando a contribuir significativamente para a solução do grave problema do lixo plástico. Outros países, como os Estados Unidos, também vem 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.

A experiência alemã e japonesa nesse campo permite 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 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 se criar uma estrutura logística que permita a coleta e classificação dos resíduos plásticos, gerando uma oferta estável desse insumo para seu processamento racional.

Do ponto de vista meramente econômico a injeção de sucata plástica em altos-fornos é inviável no Brasil. De fato, enquanto que o preço do carvão pulverizado é da ordem de 190 reais por tonelada, a sucata plástica mais barata (polietileno) apresenta custos da ordem de 400 reais por tonelada. Mas a grande vantagem dessa alternativa de reprocessamento está no fato de que ele aceita até mesmo rejeitos plásticos inadequados para reaproveitamento como material, 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 se 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 em função de suas extraordinárias propriedades. Contudo, o problema de seu destino pós-consumo vem crescendo ao longo das décadas e, mais dia menos dia, terá de ser encarado com seriedade para ser adequadamente resolvido. Isso só será conseguido de forma eficaz e permanente através de 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 forma a se encontrar uma solução em que todos saiam ganhando.

## - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIPLAST. Perfil da Indústria Brasileira de Transformação de Material Plástico - 2002. **Publicação da ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico**, 2003.
- ASANUMA, M. e outros. Development of Waste Plastics Injection Process in Blast Furnace. **ISIJ International**, March 2000, p. 244-251.
- ASHBY, M. Material Selection Charts. [http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive\\_charts](http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts). Acesso em 24 de Outubro de 2003.
- BUCHWALDER, J. e outros. Anforderungen an Reststoffe für das Einblasen in den Hochofen. **Stahl und Eisen**, Januar 2003, 29-38.
- GOTO, H. e outros. Plastics Recycling by a Coke-Oven from Waste Plastics to Chemical Raw Materials. **Nippon Steel Technical Report**, July 2002, p. 10-13.
- HOTTA, H. Recycling Technologies for Promoting Recycling-oriented Society. **NKK Technical Review**, 88, 2003, p. 160-166.
- JANZ, J. & WEISS, W. Injection of Waste Plastics into the Blast Furnace of Stahlwerke Bremen. **La Revue de Metallurgie - CIT**, Octobre 1996, p. 1219-1226.
- KATO, K. e outros. Development of Waste Plastics Recycling Process Using Coke Ovens. **ISIJ International**, Supplement, 2002, p. S10-S13.
- KATO, K. e outros. Development of Waste Plastics Recycling Process Using Coke Ovens. **Nippon Steel Technical Report**, January 2003, p. 67-69.
- LINDENBERG, H.U. e outros. Rohstoffliches Recycling von Kunststoffen als Reduktionsmittel im Hochofen. **Stahl und Eisen**, August 1996, p. 89-93.
- OGAKI, Y. e outros. Recycling of Waste Plastic Packaging in a Blast Furnace System. **NKK Technical Review**, 84, 2001, p. 1-7.
- RUMPEL, S. Die autotherme Wirbelschichtpyrolyse zur Erzeugung heizwertreicher Stützbrennstoff. **Wissenschaftliche Berichte FZKA 6490**, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, Februar 2000. 178 p.
- WAKITA, S. et al. Recycling of Waste Plastics in NKK. **SE AISI Quarterly**, December 2002, p. 60-67.

## **- O AUTOR**

Antonio Augusto Gorni. Engenheiro de Materiais, Mestre em Engenharia Metalúrgica e Doutor em Engenharia Mecânica. Engenheiro da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA há 22 anos, atuando nas áreas de aciaria e laminação a quente. Editor Técnico da Revista Plástico Industrial, da Aranda Editora. Professor do Departamento de Engenharia de Materiais da Uni-FEI - Centro Universitário da FEI. Autor de mais de 120 trabalhos técnicos apresentados em eventos nacionais e internacionais.