

UTILIZAÇÃO DE REJEITOS PLÁSTICOS NA PRODUÇÃO DE COQUE METALÚRGICO*

Luiz Filipe Cardoso de Oliveira¹
Alex Milton Albergaria Campos²
Paulo Santos Assis³

Resumo

Em usinas siderúrgicas integradas a coque, o carvão mineral tem papel fundamental principalmente na produção de coque metalúrgico, que será utilizado nos altos-fornos para produção do ferro-gusa. O coque é produzido a partir de misturas, de carvões minerais com diferentes propriedades, formuladas para atender os requisitos operacionais do processo de coqueificação e a garantir a qualidade do ferro-gusa que será produzido nos altos-fornos. Além disso, esta mistura deve ter o menor custo possível uma vez que a maior parte do carvão metalúrgico utilizado no Brasil é importado, representando assim uma grande parcela do custo do aço. O grande desafio do setor é obter misturas de carvões que atendam a coqueria e produzam coque com alta qualidade e baixo custo. Para tanto, é necessário uma otimização de vários processos, desde a compra e transporte do carvão até sua estocagem, formação das misturas e abastecimento da coqueria. Com isto, este trabalho vem com o objetivo de sugerir uma otimização e planejamento da mistura de carvão para a coqueria com a utilização de rejeitos plásticos de menor valor agregado na mistura que possibilitem a produção de coque com menor custo e com a qualidade exigida no processo de fabricação de aço.

Palavras-chave: Coqueria ; mistura de carvões ; otimização ; siderurgia;

USE OF PLASTIC REJECTS IN THE PRODUCTION OF METALLURGICAL COKE

Abstract

In coke-based steel mills, coal has a key role in the production of metallurgical coke, which will be used in blast furnaces for the production of pig iron. Coke is produced from blends of mineral coals with different properties formulated to meet the operational requirements of the coking process and to ensure the quality of the pig iron that will be produced in the blast furnaces. In addition, this mix should have the lowest possible cost since most of the metallurgical coal used in Brazil is imported, thus representing a large share of the cost of steel. The big challenge in the industry is to obtain blends of coals that meet the coking plant and produce coke with high quality and low cost. To do so, it is necessary to optimize several processes, from the purchase and transportation of the coal to its storage, formation of the blends and supply of the coking plant. The aim of this work is to optimize and plan the coal mixture for the coking plant with the use of plastic waste of lower added value in the mix that allows the production of coke with lower cost and with the quality required in the process of steel fabrication.

Keywords: Cokemaking; coal blending; optimization; ironmaking;

¹ Graduando em Engenharia Metalúrgica-Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil

² Graduado em Engenharia Metalúrgica-UFOP. Aluno de doutorado em Engenharia de Materiais-REDEMAT/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

³ Professor Doutor Titular na REDEMAT e UFOP - Escola de Minas. Pesquisador CNPq, Conselheiro da ABM e EcoEnviroX, Ouro Preto, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica no Brasil vem se reerguendo da crise dos últimos anos onde, além de problemas políticos enfrentados nacionalmente, houve uma ociosidade do setor siderúrgico mundial fazendo com que o preço do aço despencasse. Mesmo com todas as adversidades no mercado interno e externo, a siderurgia brasileira vem conseguindo recuperar sua atividade. Foi registrado em 2017 um crescimento de 1,0% em relação a 2016 sendo que a produção avançou de 31,7 milhões de toneladas de aço bruto para 34,4. Este crescimento pode estar associado ao aumento do consumo aparente de aço e pelo aumento das exportações (Instituto Aço Brasil, 2018).

No atual mercado siderúrgico, as empresas brasileiras devem ser pressionadas no sentido de melhorarem seus processos, produtos e serviços para se manterem competitivas. Devido ao alto custo de produção do aço, principalmente pela importação de insumos como o carvão mineral.

Em usinas siderúrgicas integradas a coque, o carvão mineral é fundamental, pois é matéria-prima básica para a produção do coque, a partir de misturas de carvões com características distintas. Tais misturas podem ser feitas com diferentes proporções de carvões, o que se objetiva é, ao mínimo custo, produzir um coque de qualidade. Sabe-se que hoje o coque, assim como o carvão mineral, representa cerca de 40% do custo final do aço o que faz com que as usinas busquem materiais alternativos ao carvão mineral, de menor valor agregado, para compor a mistura do coque.

2 DESENVOLVIMENTO

Um classe de material alternativo para a coqueria é o plástico pós-consumo, (plásticos que já foram utilizados) principalmente o PET (Poli tereftalato de etileno). Algumas usinas, principalmente no Japão, como a Nippon Steel já utilizam plásticos pós consumo em suas coquerias, reduzindo custos e dando destinos a resíduos que podem causar problemas ambientais. Segundo GORNI (2006) a Nippon Steel sugere que a inclusão de até 2% de plásticos na mistura de carvões para coqueria é viável, sem alterações na resistência do coque produzido. Apesar da baixa quantidade, o consumo de resíduos plásticos na coqueria da empresa pode chegar a 5.000.000 t/ano, o que representa 5% de todo lixo plástico produzido no Japão. Neste contexto, a reciclagem energética de plástico em coqueria, assim

como realizada em algumas siderúrgicas do Japão, apresenta-se como uma alternativa promissora para o aproveitamento da energia existente no plástico. Pensando no Brasil é importante ter pesquisas voltadas para reciclagem energética de plásticos em coqueria considerando o enorme potencial desta tecnologia e a realidade do país.

2.1 Poder calorífico dos plásticos e seu comportamento frente a altas temperatura

Dentre os materiais existentes nos resíduos sólidos urbanos (RSU), o plástico possui um dos maiores potenciais energéticos em termos de kcal/kg, ficando abaixo apenas da borracha como pode ser visualizado na tabela 1. Existem diversos processos como a pirólise, gaseificação, liquefação entre outros, que de forma direta ou indireta, aproveitam esta energia contida nos plásticos para a produção de combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos.

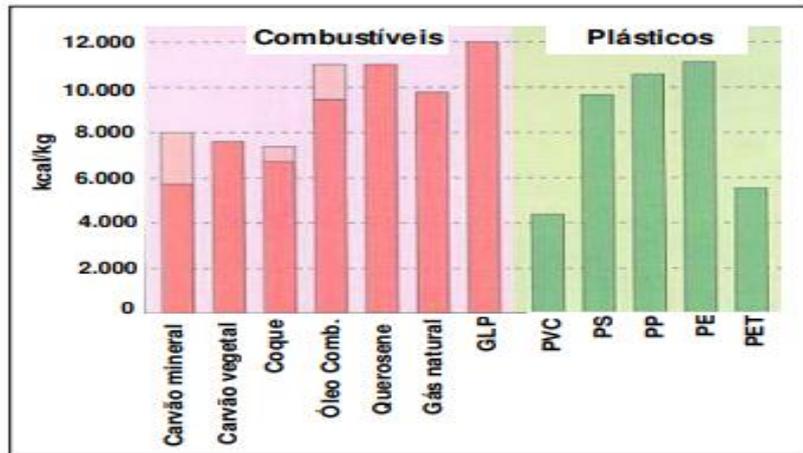
Tabela 1: Poder calorífico dos principais materiais encontrados nos RSU

Material	kcal/kg
Plásticos	6300
Borracha	6780
Couro	3630
Têxteis	3480
Madeira	2520
Alimentos	1310
Papel	4030

Fonte: EPE (2008)

Quando se avalia este potencial por tipo de resina, verifica-se que o polietileno possui o maior potencial energético dos plásticos, cabendo destacar, que é o polímero com maior participação nos resíduos sólidos urbanos. Além disso, quando compara-se os plásticos com outros combustíveis tradicionais utilizados na siderurgia, por exemplo, observa-se um potencial energético médio muito semelhante ao carvão vegetal, mineral e ao coque, como apresentado na figura 1 a seguir.

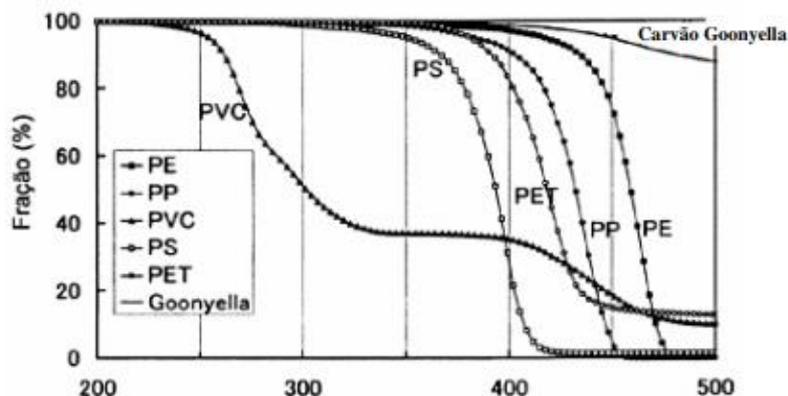
Figura 1: Comparação do poder calorífico de alguns polímeros [PVC- Poli(cloreto de vinila); PS- Poliestireno; PP- Polipropileno; PE- Polietileno; PET- Poli(tereftalato de etileno)] com os principais combustíveis existentes



Fonte: PWMI (2008), adaptado

Os principais materiais plásticos iniciam seu processo de amolecimento e fusão na faixa entre 70 e 170 °C, variando de acordo com o tipo de resina, pureza do material e existência de aditivos. A degradação térmica dos polímeros ocorre quando há a quebra das moléculas, por meio da despolimerização dos plásticos entre 200 e 500 °C, conforme apresentado no gráfico abaixo.

Figura 2: Curvas de decomposição térmica para vários tipos de resinas plásticas e do carvão *Goonyella*



Fonte: Kato et al. (2002)

A partir da figura 2, verifica-se que os plásticos se decompõem a uma temperatura bem menor do que o carvão mineral, e a 450 °C inicia-se o processo de gaseificação. Desta forma, a inserção de plásticos no carvão favorece a redução da temperatura de amolecimento do carvão, sendo considerada uma interferência positiva (DIEZ et al., 2009).

2.2 Processo de coqueificação

A coqueificação é um processo de pirólise do carvão mineral, que ocorre em atmosfera redutora, na ausência de oxigênio a uma temperatura de 1.100 a 1.350°C, obtendo como principais produtos o alcatrão, óleo leve, gás de coqueria e o coque (SILVA, 2008). Segundo Carneiro (2003) o coque é um resíduo carbonoso, poroso com alta resistência mecânica, que exerce várias funções fundamentais na produtividade do alto-forno, tais como:

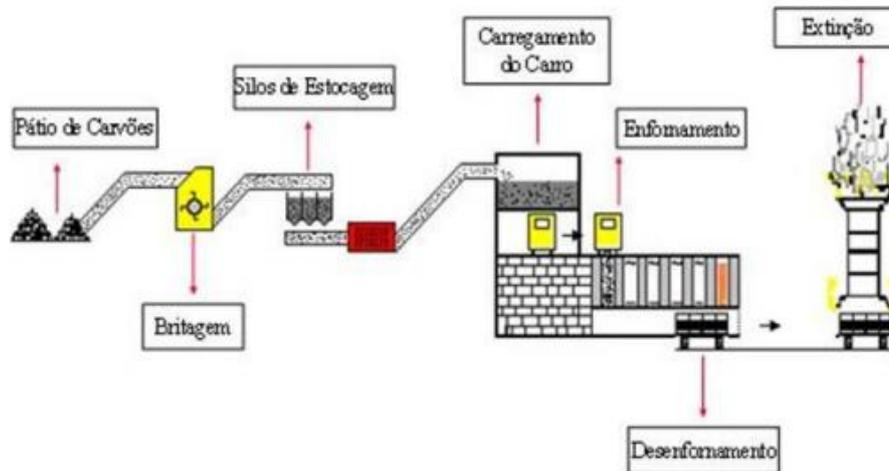
- Térmico - Suprir a maior parte do calor/energia requerida pelo processo;
- Químico - Atua como agente redutor do minério, fornecendo o carbono necessário para produção do monóxido de carbono (gás redutor);
- Físico- Sustentação da carga metálica do Alto-forno e atua como meio permeável para a ascensão dos gases e descida do metal líquido;
- Carburização do gusa- Ocorre entre 750 e 1150° C, quando o ferro combina com o carbono.

Atualmente, o coque pode ser produzido em baterias de fornos verticais ou horizontais. Sendo o primeiro tipo de fornos, existentes em Coquerias Convencionais ou *By-products*, mais comumente utilizada no mundo na produção de coque metalúrgico. Os fornos horizontais são encontrados em Coquerias *Heat Recovery*, em que não há geração de coprodutos sendo os gases queimados no próprio processo.

O processo produtivo de coque se inicia com o recebimento de diversos carvões, normalmente importados, que em seguida são direcionados a britagem para redução da granulometria e padronização. Posteriormente, são enviados para os silos de estocagem, seguido do processo de dosagem e mistura mecânica, para posterior envio ao sistema de carregamento do carro, conforme figura 3. A mistura é enfiada pelos carros de carregamento, no topo da bateria, realizando na sequência o nivelamento da carga e o aquecimento indireto do forno com a queima

de combustíveis (gás de alto-forno-GAF e gás de coqueria-GCO) nas câmaras de combustão.

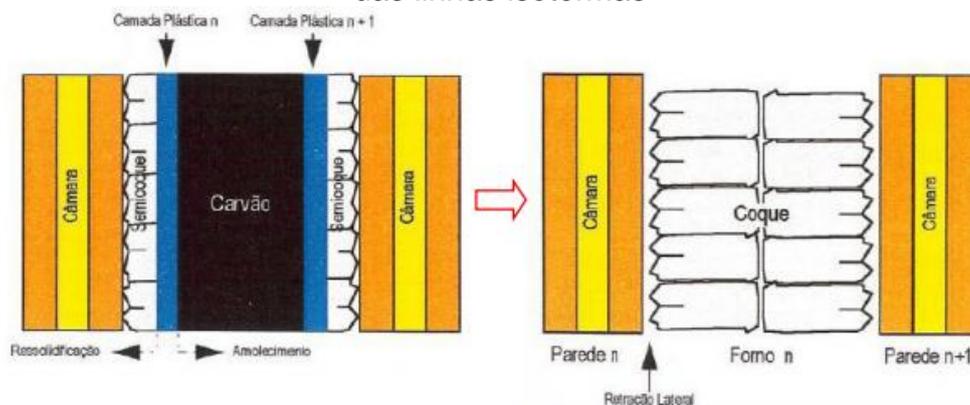
Figura 3: Esquema do processo produtivo de coque



Fonte: Uihôa (2003), adaptado

O calor é transmitido, por condução, iniciando de cada parede duas superfícies planas isotérmicas que caminham para o centro da carga, a primeira delas representada pela temperatura de amolecimento T_a e a outra, mais próxima da parede, pela temperatura de ressolidificação T_r . A velocidade de avanço das isoterms (Figura 4) constitui o *coking rate* e o processo de coqueificação finaliza com o encontro destas duas frentes plásticas (SILVA, 2011).

Figura 4: Comportamento da carga durante o processo de coqueificação e avanço das linhas isotérmicas



Fonte: Uihôa (2003)

2.3 Utilização de Plástico na Coqueria

Os primeiros testes com plásticos em coqueria tiveram início em 2000, na siderúrgica Nippon Steel em suas unidades de Nagoya e Kimitsu (KATO et al., 2002). Em 2003 já processavam 140.000 t/ano de resíduos plásticos em diversas unidades deste mesmo grupo (OKUWAKI, 2004).

A utilização de plásticos na siderurgia foi estimulada devido às similaridades químicas existentes entre o plástico, carvão e o óleo, conforme apresentado na tabela 2. Estas características motivaram especialistas alemães e japoneses, a desenvolverem estudos técnicos avaliando a utilização dos plásticos em altos fornos e coqueiras.

Em 2002, Kato et al. descreveram a experiência da empresa japonesa Nippon Steel, quanto a utilização de resíduos plásticos em suas coqueiras. O plástico pós-consumo é inicialmente limpo, processado e transformado em briquetes de 20 mm. A composição mássica da mistura utilizada era de 21% PE, 25% PS, 16% PET, 14% PP, 5% PVC e 19% outras resinas e sua composição química de 72,6% C, 9,2% H, 0,3% N, 0,04% S e 5% de cinzas.

Tabela 2: Comparação entre as análises químicas de carvão pulverizado, óleo e plástico.

% em peso	Agente Redutor		
	Carvão	Óleo	Plástico
C	79,6	85,9	83,74
H	4,32	10,5	12,38
S	0,97	2,23	0,05
Cinzas	9,03	0,05	3,08
Cl	0,2	0,04	0,75
Pb	0,005	0,0001	0,0002
Cr	0,0013	0,0002	0,0013
Ni	0,0028	0,0075	0,0011
V	0,0045	0,06	0,0002
Zn	0,0065	0,0001	0,0073
Cu	0,0015	0,0001	0,0013
K	0,2656	0,001	0,017
Na	0,0816	0,001	0,02

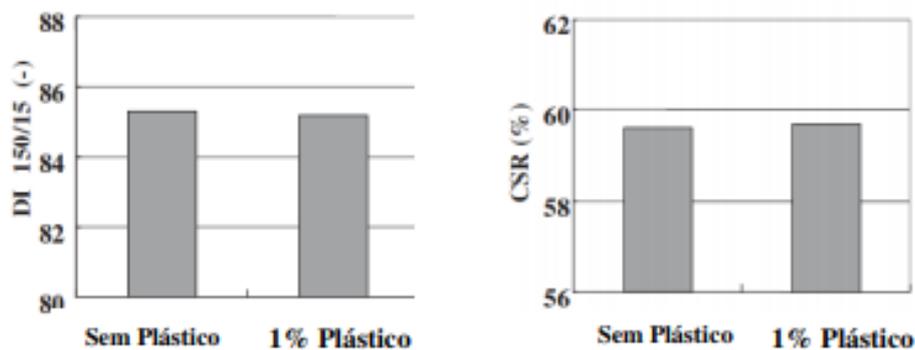
Fonte: Lindenberg (1996) apud Gorni (2004)

Durante o processo de coqueificação, os resíduos plásticos não sofrem dissociação molecular como nos altos-fornos, mas sim destilação, por trabalhar com temperaturas inferiores, da ordem de 1.000 a 1.300 °C. O rendimento médio do plástico é de 40% de óleo, 40% de gás e 20% de coque. Cabendo destacar, que a

maior parte dos plásticos alifáticos como o PE, PET e PVC se transformam em gás. E os aromáticos, como o PS, geram maiores quantidades de óleo e coque (KATO et al, 2002).

O uso de rejeito de plástico como material coqueificável é justificável, desde que não afete as características de qualidade desejadas do coque, tais como DI(Drum Índex) CRI(Coke Reactivity Índex) e CSR(Coke Strength after Reaction). Em seu artigo Kato et. al (2002) concluíram que a adição de até 1% de plástico não afetam a resistência mecânica do coque a frio (DI) e a resistência mecânica do coque após a reação com CO₂ (CSR). O valor de CSR obtido com 1% de plástico foi de aproximadamente 59,6% e o DI de 85,25%, de acordo com a figura 5. Concluíram que adições de plástico superiores a 2% não são aconselháveis, pois acarretam em queda significativa na resistência mecânica do coque.

Figura 5: Resultados de DI e CSR da Nippon Steel



Fonte: Kato et al. (2002)

Por outro lado, Liao et al. (2006) realizaram alguns experimentos em um forno piloto com capacidade de 230 kg, utilizando plásticos de resíduos sólidos somente triturados ou briquetados e variaram os percentuais de plásticos na mistura de carvão de 1 a 4%. Os melhores resultados de CRI e CSR obtidos foram na mistura de 2% de plástico briquetado conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 3: Resultados de CRI e CSR com diferentes percentuais e plásticos triturados ou briquetados

Amostra	CRI (%)	CSR (%)
Plásticos triturados		
Branco	26,1	59,4
1%	31,4	54,1
2%	31,9	52,4
4%	29,8	51,9
Plásticos briquetados		
Branco	33,1	46,9
2%	31,6	57
3%	31,9	54,7
4%	32,8	53,9

Fonte: Liao et al. (2006), adaptado

3 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que a inserção de plásticos na mistura do carvão traz ganhos na qualidade do coque, quando comparados aos resultados de misturas sem plásticos. A utilização de plásticos em coqueria apresenta-se como uma alternativa relevante do ponto de vista ambiental para reciclagem energética do plástico, considerando principalmente, o desperdício de energia com a não reciclagem de aproximadamente 5,2 milhões de toneladas de plástico por ano no Brasil e os diversos impactos causados por estes resíduos ao meio ambiente.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, a REDEMAT, a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), a EcoEnvirox e todos aqueles que contribuíram para esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1- CAMPOS, A.M.A., CHAVES, N. A., REIS, G. P., ASSIS, C.F.C., ASSIS, P.S., 2012. Use of Plastic Thin and Tires in a Blast Furnace Coke And Charcoal. Siemens VAI Ironmaking Conference. Ouro Preto, MG.Brasil.
- 2- CARNEIRO, R. T. S. O papel do coque no alto-forno. In.: Programa de Educação Continuada. São Paulo: ABM, 2003. p. 1-9.
- 3- DIEZ, M.A.; MELENDI, S.; ALVAREZ, R.; BARRIOCANAL, C. Feedstock recycling of plastic wastes/oil mixtures in cokemaking. Fuel, v. 88, p. 1937-1944, 2009.
- 4- Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2008). Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande. Disponível em: . Acesso em 22 de setembro de 2011.
- 5- FERREIRA, Alison Frederico Medeiros. **EFEITO DO USO DE PLÁSTICOS RECICLADOS E ÓLEO DE COZINHA SOBRE A QUALIDADE DO COQUE.** 2012. Dissertação (Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/724M.PDF>. Acesso em: 1 jun. 2019.
- 6- GORNI, A.A. Aproveitamento de Plásticos Pós-Consumo na Forma de Combustível para Altos-Fornos e Coqueria. **Revista Plástico Industrial.** V.2, p. 84-100, 2006.
- 7- INSTITUTO AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade. Disponível em < http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Relatorio%20de%20Sustentabilidade_2014_web.pdf>. Acesso em: 28 de maio de 2019
- 8- KATO, K; NAMURA, S.; UEMATSU, H. Development of waste plastics recycling process using coke ovens. ISIJ International, v. 42, p. 10-13, 2002.
- 9- LIAO, H. Q.; YU, G.W.; ZHAO, P.; HE, Y. B.; CAI, J. J.; LI. B. Q. New process of coking of waste plastics and blend coal. Coke Oven Managers, p. 1-6, 2006
- 10-MANCINI, S.D., BEZERRA, M.N., Zanin, M. Reciclagem de PET Advindo de Garrafas de Refrigerante Pós-Consumo. **Polímeros: Ciência e Tecnologia.** v. 8,p. 68-75, abr./jun., 1998.

- 11-OKUWAKI, A. Feedstock recycling of plastics in Japan. *Polymer Degradation and Stability*, v. 85, p. 981-988, 2004.
- 12-Plastic Waste Management Institute, (PWMI, 2009). An Introduction to Plastic Recycling Disponível em:<http://www.pwmi.or.jp/ei/plastic_recycling_2009.pdf>. Acesso em 11 de Janeiro de 2012.
- 13-RIZZO, Ernandes M. S. *Processo de Fabricação de Ferro-Gusa em Alto-Forno*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia Materiais e Mineração, 2009. 278p.
- 14-SILVA, Guilherme Liziero Ruggio da et al . Characterization of Metallurgical Coke Produced with Coal Mixtures and Waste Tires. *Materials Research*., São Carlos , v. 19, n. 3, p. 728-734, June 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0741>.
- 15-ULHÔA, M. B. Carvão Aplicado à Fabricação de Coque de Alto-Forno. *Coal & Coke ementoring*, 2003..