

UTILIZAÇÃO DE FLUFF NA MISTURA DE CARVÕES DE COQUERIA*

*Guilherme Liziero Ruggio da Silva*¹
*Erick Mitchell Henrique Braga*²
*Lorena Cristina Amorim*³
*Iara Patrícia Vieira de Oliveira*⁴
*Paulo Santos Assis*⁵
*Leandro Rocha Lemos*⁶

Resumo

No atual cenário acirrado de competitividade, umas das linhas para redução do custo da mistura de carvões é o desenvolvimento de matérias-primas alternativas nacionais que minimizem o custo do coque e mitiguem a emissão de CO₂. O presente trabalho avaliou a utilização de resíduos de shredder (fluff) como aditivo nas misturas para a produção de coque metalúrgico. A utilização de fluff na mistura de carvões minerais sugere uma rota de destinação ecologicamente correta, a fim de mitigar o impacto causado pelo acúmulo desse resíduo no meio-ambiente, além de uma alternativa para redução de custos de produção do coque metalúrgico. Foram realizados enforamentos, em escala piloto, com adição de fluff, com objetivo de avaliar o impacto sobre a qualidade do coque, especialmente sobre a Resistência após Reação com CO₂ (CSR) e a Resistência Mecânica a Frio (DI₁₅₀₋₁₅). Os resultados mostraram a viabilidade técnica da adição de até 1% em massa do material, mantendo a qualidade metalúrgica do coque produzido.

Palavras-chave: *fluff*, resíduo de *shredder*, coque, carvão mineral.

USE OF FLUFF IN THE COKING COAL BLEND

Abstract

In the current competitive scenario, one of the lines for reducing the cost of coal blending is the development of national alternative raw materials that minimize the cost of coke and mitigate CO₂ emissions. The present work evaluated the use of shredder residues (fluff) as an additive in blends for the production of metallurgical coke. The use of fluff in the coal mixture suggests an ecologically correct destination route to mitigate the impact caused by the accumulation of this residue in the environment, as well as an alternative to reduce metallurgical coke production costs. In order to evaluate the impact on the quality of the coke, especially on the Resistance after Reaction with CO₂ (CSR) and the Cold Mechanical Resistance (DI₁₅₀₋₁₅), pilot scale was created with the addition of fluff. The results showed the technical feasibility of adding up to 1% of the material, maintaining the quality of the coke produced.

Keywords: fluff, shredder residue, coke, mineral coal.

¹ Doutor em Engenharia dos Materiais REDEMAT/UFOP, Gerdau Ouro Branco, Brasil.

² Mestre em Engenharia dos Materiais REDEMAT/UFOP, Gerdau Ouro Branco, Brasil.

^{3,4} Mestranda em Engenharia de Materiais, REDEMAT, Ouro Preto,, MG, Brasil

⁵ Prof. Dr. Titular da Escola de Minas da UFOP – REDEMAT, Ouro Preto, MG, Brasil

⁶ Prof. Dr. Adjunto do DEMET – Escola de Engenharia da UFMG, MG, Brasil

1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem grande participação na produção de aço mundial, sendo o 9º maior produtor no mundo, com cerca de 34,4 milhões de toneladas de aço bruto em 2017, segundo dados do Anuário Estatístico do Setor Siderúrgico, de 2018. Devido ao cenário globalizado do mercado, as empresas se veem cada vez mais pressionadas no sentido de otimizar seus processos, produtos e serviços, para se manterem competitivas. Assim, reduzir os custos referentes às matérias-primas é essencial para a sobrevivência financeira das organizações.

No mercado siderúrgico, as usinas integradas que utilizam o coque como principal combustível representam cerca de 75% do aço bruto produzido no Brasil. No mundo cerca de 95% do ferro primário é produzido através de altos-fornos a coque (SILVA, 2011). Esse combustível é o que mais onera o custo do gusa, por se tratar de um produto oriundo de carvão mineral, material 100% importado no Brasil, pelo fato de que os carvões brasileiros não apresentam características químicas essenciais para fabricação de coque de boa qualidade.

As indústrias siderúrgicas brasileiras importaram mais de 15 milhões de toneladas de carvão metalúrgico, provenientes de diversos países, segundo o Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico em 2017. Sendo assim, o desafio da produção de coque está em projetar misturas de carvões que produzam coque a custo baixo e com elevada qualidade, através do desenvolvimento de matérias-primas alternativas, como é o caso do *fluff*.

O *fluff*, também conhecido como *resíduo do shredder* ou *auto shredder residue* (ASR), representa aproximadamente 23% do volume processado nesse tipo de equipamento, em aciarias elétricas. Segundo Zevenhoven (2003), nos últimos anos vem sendo feitos estudos visando seu reaproveitamento. A disposição final em aterros dos resíduos do shredder continua a ser, de longe, a técnica mais utilizada, no entanto, já está sendo proibida em algumas partes do mundo.

Nos Estados Unidos, alguns estados já exigem que resíduos de trituração sejam tratados para imobilizar metais pesados antes da sua eliminação em aterros industriais. Isso se deve a preocupações ambientais. Na Europa e no Japão a disposição em aterros já vem sendo proibida. Na Gerdau Cosigua, por exemplo, esse resíduo hoje representa um grande passivo devido a elevada geração e não aproveitamento do mesmo, fazendo com que ele se torne um material com elevado custo de descarte.

Neste contexto, este trabalho visa avaliar a utilização de resíduo do *Shredder* (*fluff*) adicionado à mistura de carvões, reduzindo a necessidade de utilização de carvões importados para fabricação de coque, mantendo a qualidade requerida pelo Alto-Forno, além de desenvolver uma rota de destinação de *fluff*, reduzindo seu impacto ambiental.

1.1 O processamento de sucata

O aço é o produto mais reciclável e reaproveitado do mundo. Quando finda sua vida útil, todos os produtos podem tornar-se sucata e retornar aos fornos. As Usinas Siderúrgicas semi-integradas (mini-mills) têm como maior volume de matéria-prima essa sucata sólida.

Sendo a sucata um insumo empregado em grande quantidade e com alto valor agregado, é de interesse que ela chegue ao forno com baixo nível de impurezas e dimensões adequadas, para evitar a ocorrência de interrupções e melhorar o rendimento do processo.

Parte dessa sucata pode ser processada em trituradores que fazem a função de fragmentar e separar a fração metálica (denominado “*Shredde*”) que fornecem uma sucata com elevada limpeza.

De acordo com Reckziegel (2012), o triturador de sucata *Shredder* tem a função de triturar a sucata e separar a fração metálica ferrosa. Na maioria dos casos, a principal fonte de sucata é o automóvel obsoleto, mas também inclui outros itens como geladeiras, aparelhos de ar condicionado, lavadoras etc. O equipamento triturador deve garantir a entrega da sucata fragmentada com elevada pureza, mínima segregação na geração de resíduos e a possibilidade de se obter subprodutos passíveis de utilização.

Os resíduos remanescentes desse processamento no Brasil possuem baixo aproveitamento, sendo necessário a disposição da maior parte desses resíduos em aterros, gerando um impacto ambiental negativo e aumentando o custo de processamento.

1.2 Caracterização do Resíduo de Shredder

Segundo Reckzielge (2012), o *fluff* é a fração não metálica fragmentada de qualquer tipo de sucata processada no *Shredder*, para os quais as rotas de reciclagem pouco existem. É uma mistura complexa de plástico (rígidos e espuma), borracha, vidro, madeira, papel, couro, têxtil, areia, terra além de uma fração de metálicos não segregados.

A Figura 1 apresenta a distribuição de materiais no resíduo do *Shredder*.

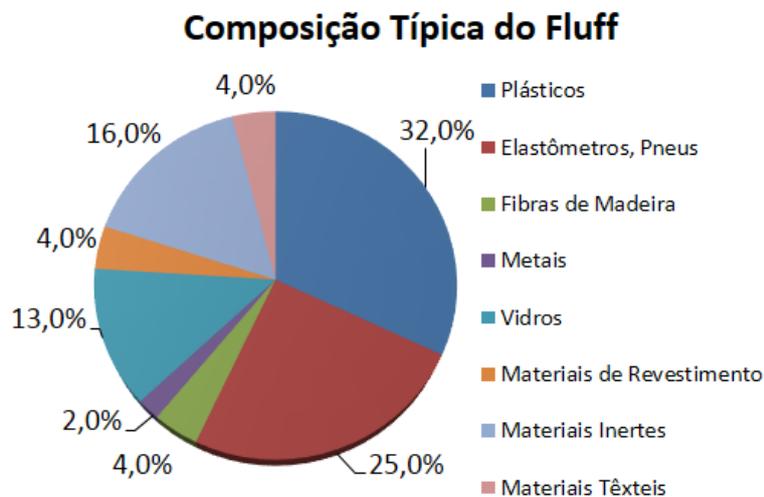


Figura 1: Composição típica do resíduo de *shredder* (Adaptado de JOY et al., 2006).

1.2 Utilização do Resíduo de Shredder na Siderurgia

Na literatura não foi encontrada aplicações do *fluff* na siderurgia. Nourreddine (2006) em seu estudo, investigou várias técnicas para reaproveitamento do ASR. Dentre essas opções, o aterro, no entanto, à medida que as regulamentações ambientais se tornam mais rigorosas, é melhor escolher outras rotas de recuperação, como a recuperação de energia em incineradores, altos fornos e fornos de cimento.

Segundo Carpenter (2010), a empresa siderúrgica Voestalpine, na Áustria, utiliza resíduos plásticos em suas instalações, substituindo cerca de 25% do carvão mineral para injeção (35kg/t gusa). A Tabela 1 mostra um comparativo da

composição química dos plásticos, usados em PCI em substituição aos carvões minerais.

Tabela 1: Composição química dos plásticos e do carvão mineral (CARPENTER, 2010).

	PE	PP	PS	PET	PVC	Waste plastics (packaging)	Pulverised coal
Carbon, wt%	85.6	85.75	92.16	64.71	41.4	77.81	79.6
Hydrogen, wt%	14.21	14.15	7.63	3.89	5.3	11.99	4.32
Sulphur, wt%	-	-	-	-	0.03	0.9	0.97
Ash, wt%	0.19	0.1	0.21	0.17	0.4	4.9	9.03
Chlorine, wt%	-	-	-	-	47.7	1.4	0.2
Potassium, wt%	-	-	-	-	-	0.048	0.2656
Sodium, wt%	-	-	-	-	-	0.092	0.0816

Além de injetar plástico em substituição ao carvão pulverizado ser economicamente melhor, segundo Carpenter (2010), injetar resíduos de plásticos reduz ainda mais as emissões de CO₂ em cerca de 30%, em comparação com coque e carvão mineral. Diez et al. (2012) testou a adição de resíduos plásticos na mistura de carvões e constatou que os benefícios ambientais nas emissões de CO₂ no processo siderúrgico, para uma adição de 2% para a produção de coque, obteve redução de 2% de CO₂ no gás de coqueria e 7% no gás de alto-forno. Além dos benefício ambiental, é mostrado, também, a vantagem de utilização desses materiais no que tange aos parâmetros pressão de coqueificação. A figura 2 mostra que a adição de plásticos, a partir de 2% em massa na mistura com carvão mineral, reduz a pressão de coqueificação.

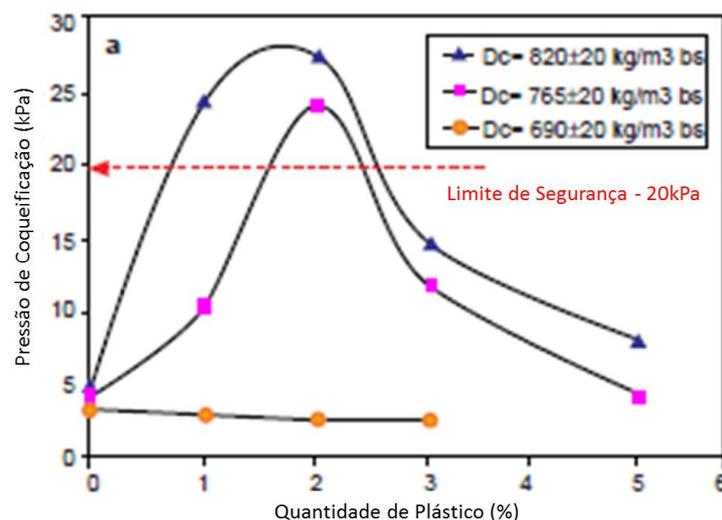


Figura 2: Pressão de coqueificação de acordo com a densidade de carga e a quantidade de plástico adicionada (DIEZ et al., 2002).

1.4 Valor em Uso

Um carvão para ser incorporado a uma mistura para coqueificação, é submetido a diversas análises químicas e caracterizações metalúrgicas necessárias para que se

avaliar o seu poder de coqueificação. A partir dessas análises, é possível definir misturas ótimas que respeitem as restrições de qualidade da mistura e do coque e tenham o menor preço possível (LEITE, 2015).

Segundo Piolet (1996), valor em uso (VIU) é o preço máximo que se pode pagar por um material de substituição sem piorar os resultados econômicos. Também é denominado preço de indiferença. A Figura 3 apresenta os parâmetros do carvão que devem ser considerados para avaliação do seu valor em uso.



Figura 3: Parâmetros do carvão para determinação do VIU.

A Figura 3 apresenta uma comparação do carvão avaliado com o carvão de referência.



Figura 3: Carvão Avaliado x Carvão de Referência.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 4 mostra, de maneira simplificada, o fluxograma das etapas experimentais. Foram realizadas amostragens e caracterizações físicas e metalúrgicas das matérias-primas utilizadas. As misturas das matérias-primas foram submetidas à coqueificação em forno piloto e o coque obtido nos enforamentos foram caracterizados física, química e metalurgicamente. Os experimentos necessários à realização deste trabalho foram realizados na Planta Piloto de Coqueria e no Laboratório de Matérias-Primas da Gerdau – Usina Ouro Branco, em Ouro Branco - MG.

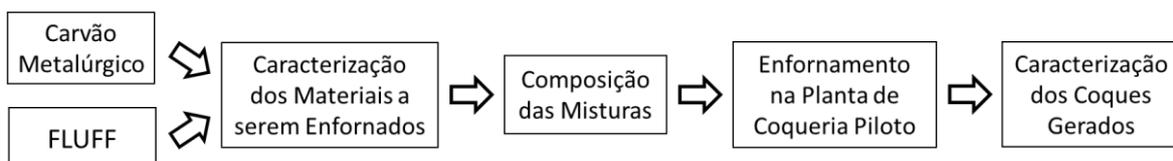


Figura 4: Fluxograma simplificado das etapas do trabalho.

Para garantir maior confiabilidade dos testes, todos os enfiamentos foram realizados em duplicata e os resultados avaliados consideraram a média das análises.

2.1 Caracterização Metalúrgica do Carvão Base

O carvão base utilizado foi o MGC, médio volátil de origem australiana, cedido pela usina siderúrgica Gerdau – Usina Ouro Branco. Uma amostra do mesmo foi coletada na correia transportadora localizada após o sistema de britagem. As tabelas 2 e 3 apresentam as análises imediata e a sua caracterização, respectivamente, em base seca.

Tabela 2: Caracterização imediata do MGC.

Carvão	Umidade (%)	Mat. Vol (%)	C Fixo (%)	Cinza (%)	Enxofre (%)
MGC 	7,00	20,74	70,15	9,12	0,60

Tabela 3: Caracterização metalúrgica do MGC.

Macerais (%)		Rank	Fluidez (ddpm)	43
Vitrinita	78,6	Reflectância (%)	Log Máx Flu	1,63
Resinita	0,8	1,57	Temp. Amolec (°C)	411
Semifusinita	12	Desvio Padrão da reflectância	Temp. MáxFlu (°C)	469
Macrinita	0,4	0,139	Temp. Solidific (°C)	493
Fusinita	1,4	Reativos (%)	Range Plástico (°C)	82
Inertodentrinita	4	83,4		
Vitrinita Oxidada	0,2	Inertes (%)		
Vitrinita Alterada	0,2	16,6		

2.2 Caracterização Física e Química do Fluff

O fluff utilizado foi cedido pela usina siderúrgica Gerdau – Usina Cosigua. Uma amostra do mesmo foi coletada no local, e na tabela 4 é mostrado a caracterização granulométrica e a fração do produto usada para os enfiamentos em escala piloto.

Tabela 0: Caracterização granulométrica do fluff.

RESÍDUOS DE SUCATA			Produto (%)
MALHAS (mm)	MASSA (kg)	MASSA (%)	
25,00	0,86	13,35	40,84
19,10	0,48	7,45	
9,5	1,31	20,34	
4,75	0,84	13,04	

< 4,75	2,95	45,81
Total:	6,44	100,00

A Figura 5 a seguir mostra o material de cada fração granulométrica.

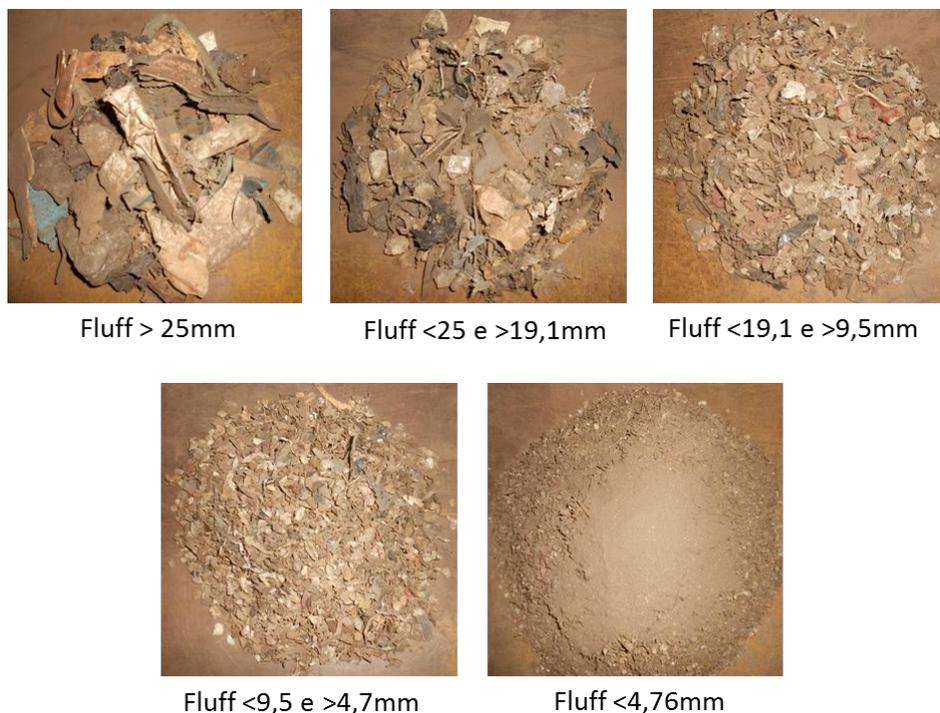


Figura 5: Fotos do material por fração granulométrica.

Como pode ser observado, o material acima de 25mm é muito grosseiro e o material <4,76mm é composto basicamente por terra, impossibilitando assim o uso dessas duas frações no trabalho.

A Tabela 5 mostra a composição química do *fluff* apenas da granulometria utilizada (<25mm e >5mm).

Tabela 5: Composição química do *fluff* na fração utilizada no trabalho.

Composição Química				
Classificação por Tipo de Componente – Porcentagem mássica				
Orgânicos ¹	Inorgânicos ²	Fe	Inox	Não ferrosos ³
65-70%	10-15%	2-8%	1-7%	2-4%

¹Orgânicos: plástico, borracha, espuma, madeira, tecido.

²Inorgânico: pedra, vidro, terra.

³Não ferrosos: cobre, alumínio, latão.

Os 65-70% de materiais orgânicos do *fluff* são constituídos basicamente por plástico, borracha, espuma, madeira e tecido, conforme mostrado na tabela 6 .

Tabela 6: Composição química do *fluff* - parte orgânica.

Plástico (%)	Borracha (%)	Espuma (%)	Tecido (%)	Madeira (%)
58,4	23,3	8,3	3,0	6,9

2.3 Enfornamentos Piloto

Os enfornamentos foram elaborados com o objetivo de substituir parte do carvão utilizado pelo *fluff*. A Tabela 7 mostra os 4 diferentes enfornamentos realizados em duplicata, com carga total de 150kg (base seca).

Tabela 7: Enfornamentos MGC+*Fluff*.

Enfornamento	Percentuais		Massa (kg)	
	MGC	<i>Fluff</i>	MGC	<i>Fluff</i>
0F	100%	0%	150kg	0kg
1F	99%	1%	148,5kg	1,5kg
5F	95%	5%	142,5 kg	7,5kg
10F	90%	10%	135kg	15kg

A Figura 6 ilustra uma pilha de carvão e *fluff* homogeneizada, antes do enfornamento ser realizado.



Figura 6: Mistura de carvão MGC e *Fluff*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Teores de Cinza e Enxofre

Na Figura 8 são mostrados os teores em massa de cinzas (a) e enxofre (b) nos coques produzidos, de acordo com as porcentagens de adição do *fluff* (0, 1, 5, e 10%).E, o resultado previsto para enfornamento de 100% *fluff* obtido através de regressão, mostrada na linha de cor vermelha.

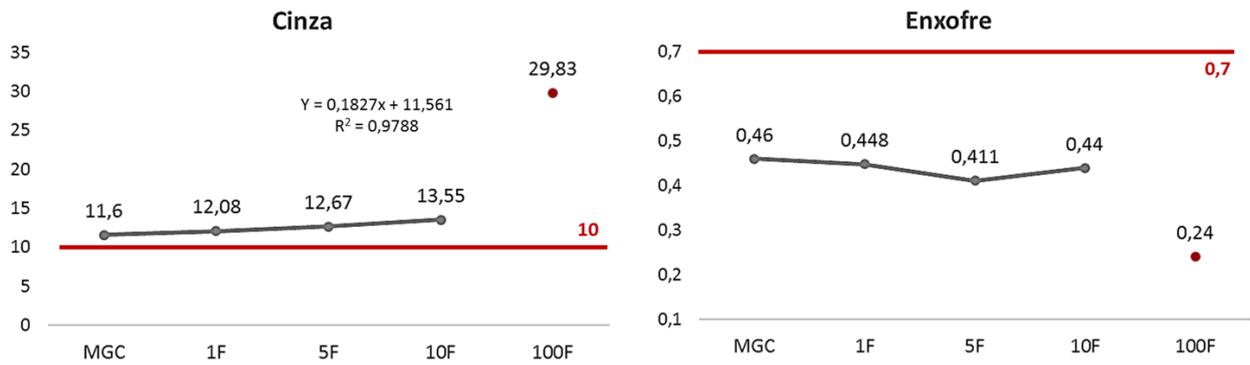


Figura 8: Teores de a) cinza e b) enxofre dos coque produzidos.

O aumento no teor de cinza, conforme aumento na adição de *fluff*, já era esperado, pois mesmo eliminando o *fluff* na fração <5mm, que contém majoritariamente terra, um pequeno percentual ainda permanece na mistura e é enforando, gerando assim cinza.

A partir dos dados obtidos, é possível inferir que todos os casos com adição de *fluff*, apresentaram teores de enxofre inferior ao da amostra de coque produzido apenas com o carvão base MGC. Isso se explica pelo fato de que o resíduo *fluff* apresenta, num geral, teor de enxofre menor do que o do carvão mineral usado.

3.2 Drum Index – DI

A Figura 9 mostra os resultados de *Drum Index* (DI₁₅₀₋₁₅) dos coques produzidos, de acordo com as porcentagens de adição do *fluff* (0, 1, 5, e 10%). O resultado previsto para enforamento de 100% *fluff* obtido através de regressão é mostrado na linha de cor vermelha.

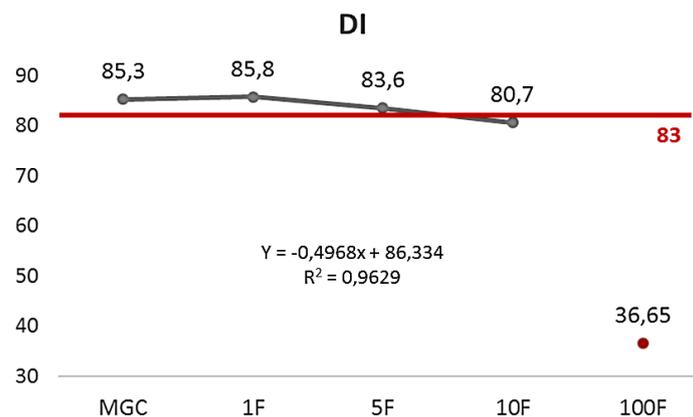


Figura 9: Resultados de DI para os coques produzidos.

De modo geral, as amostras com adição de *fluff* apresentaram tendências de queda dos valores de DI com o aumento da porcentagem do resíduo, adicionada às misturas. Porém, observou-se a existência de um ponto ótimo, de maximização da resistência mecânica do coque para 1% de participação do *fluff*.

3.3 Reatividade – CRI e Resistência Mecânica Após Reação – CSR

A Figura 10 mostra os resultados de Reatividade (CRI) e Resistência Mecânica Após Reação (CSR) dos coques produzidos, de acordo com as porcentagens de adição do *fluff* (0, 1, 5, e 10%) e o resultado previsto para enforamento de 100% *fluff* obtido através de regressão, é mostrado na linha de cor vermelha.

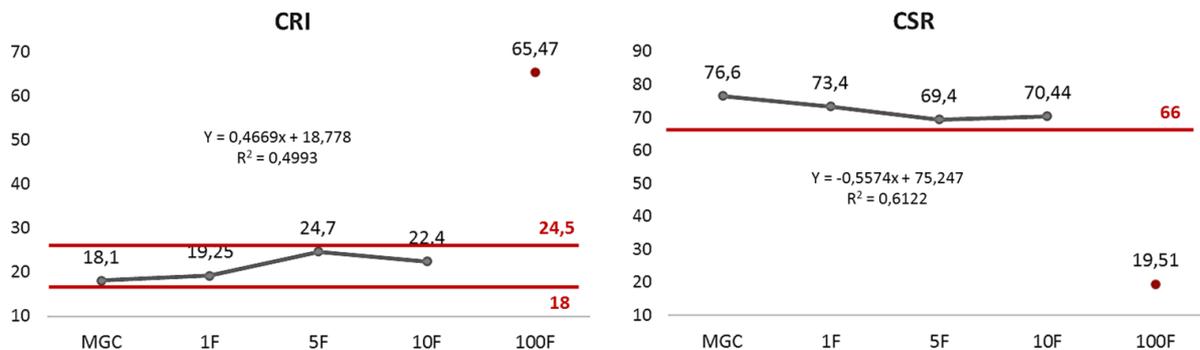


Figura 9: Resultados de CRI e CSR para os coques produzidos.

Como já era esperado, as amostras com adição de *fluff* apresentaram tendências de aumento dos valores de reatividade, com o aumento da porcentagem do resíduo adicionada às misturas. Isso se explica pelo fato do resíduo granulado, finamente disperso na mistura, durante a coqueificação, perder grande percentual de compostos voláteis, aumentando significativamente a porosidade do coque – impactando diretamente no aumento da reatividade, conforme Figura 10, em concordância com o postulado por Souza (2016).

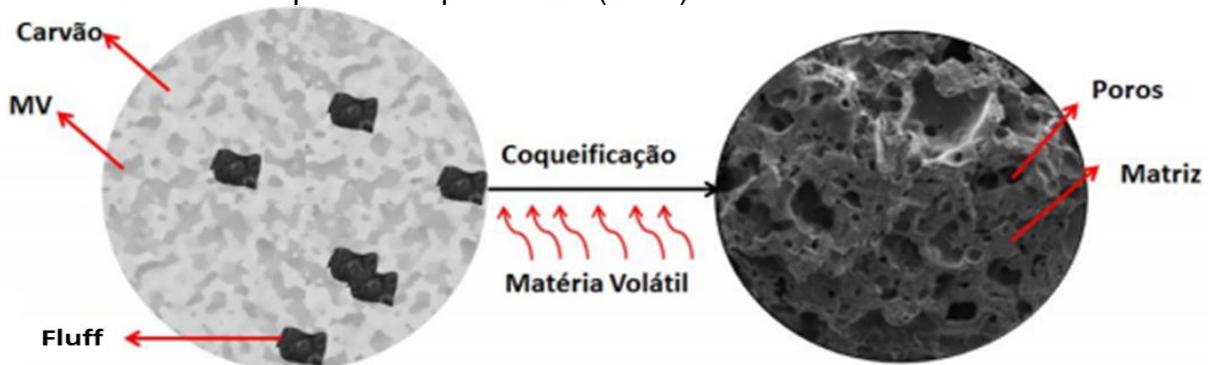


Figura 10: Aumento da porosidade do coque com adição de *fluff* (Adpt. de SOUZA, 2016).

De modo geral, os resultados de CSR estão condizentes aos níveis de reatividade obtidos. Nota-se o significativo efeito deletério da adição do *fluff* em todos os percentuais de adição.

3.4 Valor em Uso do *Fluff*

De posse dos resultados dos enforamentos, foi feita a análise do Valor em Uso do *Fluff*, conforme mostrado na Tabela 8, conforme modelo utilizado na usina siderúrgica Gerdau Ouro Branco.

Para 1 t de Peak Downs, 78% chega no forno como coque metalúrgico e small coque.

Tabela 8: VIU Fluff.

Base	Deméritos de Qualidade				VIU Fluff
Carvão referência	Rend. Global	Cinza	CSR	DI	
PEAK Downs	78,14	13,53	75,35	84,67	
Fluff	18,74	29,8	19,51	36,65	
100%	-59,40%	-8,40%	-4,10%	-4,40%	23,70%

4 CONCLUSÃO

A utilização de *fluff* nas misturas de carvões para produção de coque metalúrgico representa uma alternativa para redução do custo do coque, bem como contribui para a mitigação do impacto ambiental, causado pela disposição desse resíduo.

Os resultados dos percentuais de enxofre, dos coques produzidos, mostraram que a adição do *fluff* nas misturas contribui para a redução do teor desse elemento no coque. Os valores de DI, apesar de, em um modo geral, apresentarem queda, observou-se um ponto ótimo de resistência, com 1% de participação do *fluff*.

Quanto aos resultados do teor de cinza, reatividade e resistência, após reação dos coques, pôde-se observar demérito. Entretanto, a participação de 1% de *fluff* ainda mostra um possível cenário de utilização desse resíduo, visto que apesar da queda na qualidade, o benefício na redução do impacto ambiental e de custo ainda supre os malefícios observados.

Para ser economicamente viável na mistura de carvões, o preço máximo do fluff é de 24% do carvão referência (Peak Downs).

Agradecimentos

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS

- 1 **Anuário Estatístico: Setor Metalúrgico/ Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral.** 2016. Brasília.
- 2 CARPENTER, A. M. **Injection of Coal and Waste Plastics in Blast Furnaces.** IEA Clean Coal Center. 2010.
- 3 DIEZ, M.A.; ÁLVAREZ, R.; MELENDI, S. **El Proceso Siderúrgico Como Vía de Reciclado de Resíduos Plásticos.** Instituto Nacional del Carbón – INCAR-CSIS. Oviedo. 2012.
- 4 LEITE, M. R. **Avaliação do Impacto do Teor de Enxofre de Carvões Metalúrgicos nos seus Valores em Uso.** Dissertação para obtenção de título de Mestre em Engenharia. Programa de Pós-Graduação Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2015.
- 5 LOISON, R. et al.; **Coal in General. Coke Quality and Production.** Paris: Butterworth, 1989.

- 6 PlasticsEurope – AISBL. **Plastics Convert Iron Ore to Steel - Feedstock Recycling in Blast Furnaces.** 2006.
- 7 RECKZIEGEL, V. N. **Caracterização para Aproveitamento do Resíduos de um Triturador de Sucata em Usina Siderúrgica.** Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGM3. Porto Alegre. 2012.
- 8 SILVA, G. L. R.. **Otimização da mistura de carvões na produção de coque metalúrgico.** Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto – REDEMAT UFOP, Minas Gerais. 2011.
- 9 SOUZA, R. D. S. **Caracterização de Coque Metalúrgico Produzido com Adição de Pneu Inservíveis nas Misturas de Carvão Mineral.** Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto – REDEMAT UFOP, Minas Gerais. 2016.
- 10 ZEVENHOVEN, R.; SAEED, L. **Automotive shredder residue (ASR) and compact disk (CD) waste: options for recovery of materials and energy.** Helsinki University of Technology. Energy Engineering and Environmental Protection. Finland. 2003.